

# **UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

## **ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO FIN DE GRADO**



## **ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN ARCO DE SEGURIDAD DE UN VEHÍCULO DE COMPETICIÓN**

**Autor: Daniel Fernández Díaz**

**Tutor: Dr. Alejandro Quesada González**

**Leganés a 23 de Febrero de 2014**



# ÍNDICE

ÍNDICE .....	1
ÍNDICE DE IMÁGENES .....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
1 INTRODUCCIÓN .....	10
1.1 HISTORIA.....	10
1.2 COMPONENTES DE SEGURIDAD.....	12
1.2.1 CASCO.....	12
1.2.2 HANS .....	14
1.2.3 ROPA IGNÍFUGA.....	15
1.2.4 ASIENTOS DE COMPETICIÓN TIPO BAQUET.....	16
1.2.5 ARNÉS DE SEGURIDAD.....	17
1.2.6 ARCO DE SEGURIDAD .....	18
2 OBJETIVOS.....	22
3 REQUISITOS DE LA ESTRUCTURA SEGÚN NORMATIVA.....	23
3.1 REQUISITOS APARA REALIZAR EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA .....	23
3.1.1 TIPOS DE ESTRUCTURA BÁSICA.....	23
3.1.2 TIPOS DE MIEMBROS Y TIRANTES OBLIGATORIOS.....	25
3.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS COMPONENTES .....	27
3.3 REQUISITOS DEL MATERIAL .....	28
4 TIPOS DE ENSAYOS .....	29
5 MATERIAL.....	32
6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA QUE SE PROPONE .....	34
6.1 PROPUESTA DE ESTRUCTURA BÁSICA .....	35
6.2 PROPUESTA DE MIEMBROS Y TIRANTES OBLIGATORIOS .....	37
6.3 APROXIMACIÓN DEL ESPESOR.....	39
7 PLANTEAMIENTO DE MODELIZACIONES Y ANÁLISIS.....	44
7.1 ELEMENTOS TIPO BEAM.....	44
7.1.1 MODELIZACIÓN.....	45
7.1.2 ANÁLISIS ENSAYO 1 (CARGA PUNTUAL) .....	58

7.1.3	RESULTADOS ANÁLISIS 1 (CARGA PUNTUAL) .....	72
7.1.4	ANÁLISIS ENSAYO 2 (CARGA DISTRIBUIDA) .....	76
7.1.5	RESULTADOS ENSAYO 2 (CARGA DISTRIBUIDA) .....	81
7.2	ELEMENTOS TIPO SHELL .....	85
7.2.1	MODELIZACIÓN ENSAYO 1 (CARGA PUNTUAL) .....	85
7.2.2	ANÁLISIS ENSAYO 1 (CARGA PUNTUAL) .....	94
7.2.3	RESULTADOS ENSAYO 1 (CARGA PUNTUAL) .....	102
7.2.4	MODELIZACIÓN ENSAYO 2 (CARGA DISTRIBUIDA) .....	107
7.2.5	ANÁLISIS ENSAYO 2 (CARGA DISTRIBUIDA) .....	108
7.2.6	RESULTADOS ENSAYO 2 (CARGA DISTRIBUIDA) .....	111
7.3	PROPUESTAS DE SOLUCIONES .....	116
7.3.1	SOLUCIÓN 1 (AUMENTO DE ESPESOR) .....	117
7.3.1.1	MODELIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN 1 MEDIANTE EL ENSAYO 2 .....	117
7.3.1.2	ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN 1 MEDIANTE EL ENSAYO 2 .....	118
7.3.1.3	RESULTADOS DE LA SOLUCIÓN 1 MEDIANTE ENSAYO 2 .....	121
7.3.2	SOLUCIÓN 2 (INCORPORACIÓN DE BARRAS OPCIONALES) .....	124
7.3.2.1	MODELIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN 2 .....	125
7.3.2.2	ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN 2 MEDIANTE EL ENSAYO 2 .....	127
7.3.2.3	RESULTADOS DE LA SOLUCIÓN 2 MEDIANTE ENSAYO 2 .....	129
7.3.2.4	MODELIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN 2 MEDIANTE EL ENSAYO 1 .....	133
7.3.2.5	ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN 2 MEDIANTE EL ENSAYO 1 .....	134
7.3.2.6	RESULTADOS DE LA SOLUCIÓN 2 MEDIANTE ENSAYO 1 .....	135
7.4	MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS CON CATIA .....	139
7.4.1	MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA .....	139
7.4.2	ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA FINAL MEDIANTE ENSAYO 1 .....	151
7.4.3	RESULTADOS DE LA ESTRUCTURA FINAL MEDIANTE ENSAYO 1 .....	153
7.4.4	ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA FINAL MEDIANTE ENSAYO 2 .....	156
7.4.5	RESULTADOS DE LA ESTRUCTURA FINAL MEDIANTE ENSAYO 2 .....	156
8	IMÁGENES DE LA ESTRUCTURA FINAL .....	161
9	PRESUPUESTO ECONÓMICO .....	164
10	CONCLUSIONES .....	166
11	TRABAJOS FUTUROS .....	167
12	BIBLIOGRAFÍA .....	169





<b>ANEXO A: Artículo 253 – 2012“Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)”, referencia bibliográfica [16].....</b>	<b>171</b>
<b>ANEXO B: TIPOS DE ENSAYOS, referencia bibliográfica [14] .....</b>	<b>180</b>
<b>ANEXO C: GIROS Y DESPLAZAMIENTOS DE VIGAS DE UN SOLO TRAMO, referencia bibliográfica [2].....</b>	<b>183</b>

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Ilustración 1 - Peugeot 205 Turbo 16 Gr.B año 1985 .....	11
Ilustración 2 - Lancia Delta HF 4WD Gr.A año 1987 .....	11
Ilustración 3 - Subaru Impreza WRC año 1997 .....	12
Ilustración 4 - Casco abierto .....	13
Ilustración 5 - Casco cerrado .....	14
Ilustración 6 - HANS .....	14
Ilustración 7 - HANS de Nico Rosberg .....	15
Ilustración 8 - Ropa ignífuga .....	16
Ilustración 9 - Asiento de competición tipo BACQUET .....	17
Ilustración 10 - Arnés de seguridad .....	18
Ilustración 11 - Arco de seguridad .....	19
Ilustración 12 - Arco de seguridad atornillado .....	19
Ilustración 13 - Arco de seguridad soldado .....	20
Ilustración 14 - Accidente Latvala .....	21
Ilustración 15 - Opción A .....	24
Ilustración 16 - Opción B .....	24
Ilustración 17 - Opción C .....	24
Ilustración 18 - Tipos de tirantes diagonales .....	25
Ilustración 19 - Tipos de tirantes de puerta .....	26
Ilustración 20 - Tipos de elementos de refuerzo de techo .....	26
Ilustración 21 - Tipo de refuerzo del parabrisas .....	27
Ilustración 22 - Requisitos geométricos de la sección .....	28
Ilustración 23 - Ensayo 1 .....	29
Ilustración 24 - Carga en el plano YZ y XY respectivamente .....	30
Ilustración 25 - Ensayo 2 .....	30
Ilustración 26 - Parte delantera .....	34
Ilustración 27 - Parte trasera .....	34
Ilustración 28 - Vehículo completo .....	35
Ilustración 29 - Elección de tirantes traseros .....	37
Ilustración 30 - Anclajes delanteros .....	37
Ilustración 31 - Elección refuerzos del techo .....	38
Ilustración 32 - Refuerzo del parabrisas .....	38
Ilustración 33 - Elección tirantes de puertas .....	39
Ilustración 34 - Estructura .....	40
Ilustración 35 - Ventana inicio de Ansys Mechanical APDL .....	45
Ilustración 36 - Ventana de trabajo .....	46
Ilustración 37 - Keypoints del arco principal .....	47
Ilustración 38 - Keypoints y líneas del arco principal .....	47
Ilustración 39 - Estructura con radios de acuerdo .....	48
Ilustración 40 - Primer semiarco lateral .....	49

Ilustración 41 - Semiarcos laterales .....	49
Ilustración 42 - Miembro transversal .....	50
Ilustración 43 - Tirantes traseros .....	51
Ilustración 44 - Diferencia de alturas de anclaje .....	51
Ilustración 45 - Herramienta Check Geom. ....	52
Ilustración 46 - Resultado al dividir la primera línea .....	53
Ilustración 47 - Estructura parcial 1 .....	54
Ilustración 48 - Keypoints para tirantes delanteros .....	55
Ilustración 49 - Estructura parcial 2 .....	55
Ilustración 50 - Estructura con refuerzos del techo .....	56
Ilustración 51 - Aclaración de cálculo para refuerzos del parabrisas .....	57
Ilustración 52 - Estructura con pilares de refuerzo del parabrisas .....	57
Ilustración 53 - Estructura con tirantes de puertas .....	58
Ilustración 54 - Ventana Element Type .....	59
Ilustración 55 - Librería de tipos de elementos .....	60
Ilustración 56 - Elección de Element Types .....	60
Ilustración 57 - Ventana Real Constants .....	61
Ilustración 58 - Datos del Set 1 .....	62
Ilustración 59 - Datos del Set 2 .....	64
Ilustración 60 - Ventana de atributos Type 1 .....	64
Ilustración 61 - Ventana de atributos Type 2 .....	65
Ilustración 62 - Ventana de selección de mallado .....	65
Ilustración 63 - Estructura mallada .....	66
Ilustración 64 - Elementos que componen la estructura .....	67
Ilustración 65 - Nodos que componen la estructura .....	67
Ilustración 66 - Pies de anclaje .....	68
Ilustración 67 - Ventana de Displacement .....	68
Ilustración 68 - Estructura con restricciones de movimientos .....	69
Ilustración 69 - Zona de aplicación de la carga puntual .....	70
Ilustración 70 - Ventana de propiedades de la carga puntual .....	71
Ilustración 71 - Estructura con carga puntual .....	71
Ilustración 72 - Aviso de solución realizada .....	72
Ilustración 73 - Ventana de selección de resultados .....	73
Ilustración 74 - Resultados de desplazamientos con carga puntual .....	73
Ilustración 75 - Desplazamiento máximo a la izquierda y mínimo a la derecha .....	74
Ilustración 76 - Ventana para definir la leyenda .....	75
Ilustración 77 - Resultados tensionales con carga puntual .....	75
Ilustración 78 - Tensión máxima a la derecha y mínima a la izquierda .....	76
Ilustración 79 - Herramienta de selección .....	77
Ilustración 80 - Zona posterior de la estructura principal .....	78
Ilustración 81 - Opciones para seleccionar nodos .....	78
Ilustración 82 - Nodos donde ubicar la carga distribuida .....	79
Ilustración 83 - Carga distribuida .....	80
Ilustración 84 - Estructura completa con carga distribuida .....	80
Ilustración 85 - Resultados de desplazamientos con carga distribuida .....	81

Ilustración 86 - Desplazamiento máximo a la izquierda y mínimo a la derecha .....	82
Ilustración 87 - Resultados tensionales con carga distribuida (1).....	83
Ilustración 88 - Resultados tensionales con carga distribuida (2).....	83
Ilustración 89 - Resultados tensionales con carga distribuida (3).....	84
Ilustración 90 - Tensión máxima a la izquierda y mínima a la derecha.....	84
Ilustración 91 - Visualización de las barras a dividir.....	85
Ilustración 92 - División de todas las barras que llegan a la unión .....	86
Ilustración 93 - Área circular para crear las superficies de la barra 1 .....	87
Ilustración 94 - Superficies extruidas de la barra 1 .....	88
Ilustración 95 - Líneas que forman las superficies de la barra 1 .....	88
Ilustración 96 - Superficies sin dividir de las barras 1 y 2.....	89
Ilustración 97 - Superficies de la barra 2 atraviesa las superficies de la barra 1 .....	89
Ilustración 98 - Primera operación de dividir entre las barras 1 y 2 .....	90
Ilustración 99 - Segunda operación de dividir entre las barras 1 y 2 .....	91
Ilustración 100 - Superficies sin dividir de las barras 2 y 3.....	91
Ilustración 101 - Superficies de las barras 2 y 3 divididas.....	92
Ilustración 102 - Superficies de las barras de la unión 1.....	93
Ilustración 103 - Superficies de las barras de la unión 1.....	93
Ilustración 104 - Beam arriba y Shell abajo.....	94
Ilustración 105 - Todos los elementos del modelo .....	95
Ilustración 106 - Valores para definir los elementos Shell.....	96
Ilustración 107 - Ventanas de atributos para Type 1, 2 y 3.....	97
Ilustración 108 - Mallado de los elementos Beam.....	98
Ilustración 109 - Aviso al mallar las áreas .....	98
Ilustración 110 - Mallado de las áreas.....	99
Ilustración 111 - Nodos de elementos Beam y Shell a unir.....	99
Ilustración 112 - Elementos que unen la parte Beam y Shell.....	100
Ilustración 113 - Área donde se ubica la carga puntual.....	101
Ilustración 114 - Carga puntual .....	102
Ilustración 115 - Estructura con carga puntual.....	102
Ilustración 116 - Resultados de desplazamientos con carga puntual con elementos Beam y Shell arriba y con elementos beam sólo abajo .....	103
Ilustración 117 - Resultados tensionales con elementos Beam y Shell .....	104
Ilustración 118 - A la derecha tensión máxima y a la izquierda tensión en soldadura .....	105
Ilustración 119 - Modelo sin elementos de unión Beam con Shell.....	105
Ilustración 120 - Zonas de selección de un nodo para comparar valores de tensión.....	106
Ilustración 121 - Visualización de las barras a dividir.....	107
Ilustración 122 - Superficies de las barras de la unión 1.....	108
Ilustración 123 - Visualización de las líneas 94 y 99.....	109
Ilustración 124 - Visualización de la línea 63 de las superficies de la barra.....	110
Ilustración 125 - Estructura con carga distribuida en Beam y Shell.....	111
Ilustración 126 - Resultados de desplazamientos con carga distribuida (1) .....	112
Ilustración 127 - Resultados de desplazamientos con carga distribuida (2) .....	112
Ilustración 128 - Resultados de deformación con carga distribuida con elementos Beam y Shell a la izquierda y con Beam sólo a la derecha .....	113

Ilustración 129 - Resultados tensional con carga distribuida.....	113
Ilustración 130 - Localización de la tensión máxima.....	114
Ilustración 131 - Modelo sin elementos de unión Beam con Shell.....	114
Ilustración 132 - Zona de selección de un nodo para comprar valores de tensión .....	115
Ilustración 133 - Visualización de la estructura de la solución 1 .....	117
Ilustración 134 - Todos los elementos del modelo .....	118
Ilustración 135 - Distribución de los diferentes Types en la barra horizontal .....	120
Ilustración 136 - Valores para definir los elementos Beam .....	120
Ilustración 137 - Valores para definir los elementos Shell.....	121
Ilustración 138 - Estructura con carga distribuida en Beam y Shell.....	121
Ilustración 139 - Resultados de desplazamientos con carga puntual con elementos Beam y Shell (solución 1) arriba y con elementos beam sólo abajo .....	122
Ilustración 140 - Resultados de deformación de la solución 1 arriba y sin aumento de espesor de la barra horizontal abajo .....	123
Ilustración 141 - Modelo sin elementos de unión Beam con Shell.....	124
Ilustración 142 - Opciones de barras para la solución 2 .....	125
Ilustración 143 - Estructura con los refuerzos de la solución 2 .....	126
Ilustración 144 - Unión que se modeliza en la solución 2 .....	127
Ilustración 145 - Estructura con las superficies de las dos uniones traseras .....	127
Ilustración 146 - Aviso al mallar las áreas .....	128
Ilustración 147 - Estructura de la solución 2 con carga distribuida .....	129
Ilustración 148 - Resultados de desplazamientos de la solución 2.....	129
Ilustración 149 - Resultados de desplazamientos de la estructura con carga distribuida con Beam y Shell .....	130
Ilustración 150 - Situación de la tensión máxima .....	131
Ilustración 151 - Resultados de deformación de la solución 2 arriba y sin los refuerzos abajo	131
Ilustración 152 - Modelo sin elementos de unión Beam con Shell.....	132
Ilustración 153 - Nueva situación de la tensión máxima .....	132
Ilustración 154 - Zona de selección de un nodo para comprar valores de tensión .....	133
Ilustración 155 - Estructura con áreas de la unión 1 solución 2 .....	134
Ilustración 156 - Estructura mallada unión 1 solución 2.....	135
Ilustración 157 - Resultados de desplazamientos del ensayo 1 de la solución 2 a la izquierda y sin refuerzos a la derecha .....	136
Ilustración 158 - Resultados tensionales del ensayo 1 de la solución 2.....	136
Ilustración 159 - Resultados tensionales del ensayo 1 sin refuerzo de la solución 2 .....	137
Ilustración 160 - Tensión máxima del ensayo 1 de la solución 2 .....	137
Ilustración 161 - Modelo sin elementos de unión Beam con Shell.....	138
Ilustración 162 - Pantalla de inicio de Catia .....	140
Ilustración 163 - Pantalla de trabajo de Part Design.....	141
Ilustración 164 - Sketch del arco principal .....	142
Ilustración 165 - Sketch del perfil de la barra .....	142
Ilustración 166 - Ventana de opciones de la herramienta “sweep” .....	143
Ilustración 167 - Superficies del arco principal .....	144
Ilustración 168 - Perfil y guía del tirante trasero izquierdo .....	144
Ilustración 169 - Superficies del arco principal y tirante trasero .....	145

Ilustración 170 - Sin usar Trim a la izquierda y usándolo a la derecha .....	145
Ilustración 171 - Diseño de la estructura final con Catia .....	146
Ilustración 172 - Ejemplo de diseño de un pie de anclaje.....	147
Ilustración 173 - Pies de anclaje donde realizar alargamiento .....	147
Ilustración 174 - Estructura final con espesor 4 milímetros .....	148
Ilustración 175 - Librería de materiales de Catia .....	148
Ilustración 176 - Propiedades del material 25CrMo4 .....	149
Ilustración 177 - Estructura final con material.....	149
Ilustración 178 - Modificación de la estructura para aplicar la carga puntual.....	150
Ilustración 179 - Ventana de propiedades del mallado .....	151
Ilustración 180 - Mallado de la estructura final .....	151
Ilustración 181 - Estructura final con carga puntual y restricciones de movimientos .....	152
Ilustración 182 - Resultados de desplazamientos con Catia en la parte superior y con Ansys en la parte inferior .....	153
Ilustración 183 - Comparación de la estructura sin deformar y deformada respecto ensayo 1 .....	154
Ilustración 184 - Resultados tensionales con Catia en la parte superior y con Ansys en la parte inferior.....	155
Ilustración 185 - Estructura final con carga distribuida y restricciones de movimientos .....	156
Ilustración 186 - Resultados de desplazamientos con Catia en la parte superior y con Ansys en la parte inferior .....	157
Ilustración 187 - Otra vista de los resultados de deformación con Catia .....	158
Ilustración 188 - Comparación de la estructura sin deformar y deformada respecto ensayo 2 .....	158
Ilustración 189 - Resultados tensionales con Catia del ensayo 2.....	159
Ilustración 190 - Resultados tensionales con Ansys del ensayo 2 .....	160
Ilustración 191 - Alzado de la estructura final .....	161
Ilustración 192 - Perfil izquierdo de la estructura final.....	161
Ilustración 193 - Parte trasera de la estructura final .....	161
Ilustración 194 - Planta de la estructura final .....	162
Ilustración 195 - Isométrico de la estructura final .....	162
Ilustración 196 - Ejemplo de un arco de seguridad para un Renault Clio 2 .....	165



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Propiedades físicas del material 25CrMo4 .....	32
Tabla 2 - Composición química del material 25CrMo4 .....	32
Tabla 3 - Componentes de la estructura básica .....	36
Tabla 4 - Precios de los materiales .....	164

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 HISTORIA

Cuando se pronuncia la palabra *deporte* a todas las personas les viene a la mente la palabra *fútbol*, ya que es el deporte por excelencia. Pero cada vez hay más y más adeptos al *mundo del motor*, como automovilismo o motociclismo entre otros.

El mundo del automovilismo de competición, que es el deporte que se trata en este trabajo, ha sufrido una gran cantidad de cambios a lo largo de su historia. Cambios en los terrenos en los que se compite mejorando el espectáculo y la seguridad, en el apartado tecnológico, en los diferentes vehículos que se utilizan y en los componentes de seguridad que llevan los monoplazas y pilotos. Debido al amplio abanico de coches y cilindradas que se pueden utilizar para competir en un rally, existen numerosas categorías y cada una con un reglamento diferente.

Las primeras carreras de automovilismo se produjeron a finales del s.XIX y la mayoría de ellas en territorio francés. Se disputaban sobre terrenos abiertos y sin asfaltar, con salida en París y meta en ciudades cercanas como Ámsterdam, Viena, etc. Los monoplazas eran impulsados por gasolina o vapor. Año tras año los rallyes fueron evolucionando de una forma muy fuerte, debido a diferentes accidentes mortales con consecuencias mortales se introdujeron mayores medidas de seguridad y los vehículos fueron siendo más sofisticados.

Pero hasta los años sesenta no se consolidaron los rallyes como una especialidad del automovilismo. Uno de los puntos más importantes en el mundo de los rallyes se produjo en 1965, cuando se introdujo la aparición de la reglamentación *Anexo J* escrito por la FIA. En este documento se establecieron de manera clara el tipo de vehículos permitidos, con sus consiguientes grupos y clases que se definían en función de su preparación.

En los años ochenta se introdujeron grandes marcas de coches en el mundial como son Ford, Audi, Opel y Lancia; además nació la categoría Grupo B, que marcaría un antes y un después en los rallyes. Este grupo lo formaban coches con características extremas. Se establecieron pesos mínimos muy bajos, no había límites de potencia y se permitió el uso de chasis tubulares con carrocerías de fibra. Un ejemplo fue el mítico Peugeot 205 Turbo 16 cuyo motor desarrollaba 500 CV con un peso de apenas 980 kg, Ilustración 1.





**Ilustración 1 - Peugeot 205 Turbo 16 Gr.B año 1985**

Dichos coches eran fascinantes desde el punto de vista mecánico y competitivo pero no iban acompañados de la seguridad, lo cual, produjo varias muertes. Por todo esto se incrementaron las medidas de seguridad, cambiando de Grupo B a Grupo A. A partir de este nuevo cambio las prestaciones y la seguridad de los monoplazas fueron a la par.



**Ilustración 2 - Lancia Delta HF 4WD Gr.A año 1987**

Y por último, en 1997, este nuevo grupo se cambió a los World Rally Cars donde los avances mecánicos y de seguridad empezaron a ir de la mano, por ejemplo Subaru Impreza WRC ilustración 3. Esta especialidad corresponde a la categoría que se disputa actualmente y convive con el *Grupo N o Super 2000*, vehículos con motores atmosféricos, cuyo objetivo es asentar las futuras regulaciones que se incorporarán en los World Rally Cars. En los vehículos WRC se incluye la más alta tecnología y la mejor mecánica posible con el objetivo de introducirla en los coches de calle y se debe seguir estrictamente la reglamentación de seguridad impuesta por la FIA.



Ilustración 3 - Subaru Impreza WRC año 1997

## 1.2 COMPONENTES DE SEGURIDAD

Las normas que rigen los componentes de seguridad, que se explican a continuación, han sido creadas por la “FIA” en la referencia bibliográfica [7].

### 1.2.1 CASCO

La reglamentación de los cascos está recogida en el siguiente listado de normas:

- FIA Standard 8860-2004/8860-2010 referencia bibliográfica [4].
- Snell SA 2000 (no será válida a partir del 31/12/2014)
- Snell SA 2005/2010
- SFI 31.1/31.1A/31.2<sup>a</sup>

El casco es un elemento de seguridad muy importante, puesto que es el único accesorio que protege la cabeza del piloto y copiloto. Cualquier golpe en la cabeza puede derivar a lesiones muy fuertes pudiendo llegar en ocasiones hasta la muerte.

La norma Fia Standard 8860-2010, referencia [4] recoge todos los requisitos que deben presentar los cascos. Estos accesorios deben pasar una serie de pruebas de dureza y confort especificadas en la norma Snell SA 2010. Estas pruebas consisten en ensayos de impacto lineal, de proyecciones, de abrasión superficial, de penetración y de aplastamiento; siempre en unas condiciones atmosféricas específicas. Para que el casco sea homologado debe llevar una etiqueta revisada y certificada por la FIA donde se especifiquen la norma de homologación, el nombre del fabricante, el nombre del modelo, el tamaño, el número de homologación, la fecha de fabricación y el número de serie del casco.

Los cascos deben soportar la energía del choque con cualquier objeto impidiendo que atravesase su superficie y dañe la cabeza de la persona. No debe producirse ninguna fisura en caso de impacto. La capa exterior debe construirse con una fibra de carbono reforzado con sistema epoxi endurecido y por dentro han de estar forrados por un material ignífugo. Este tipo de material con el que se realizan los cascos da unas características muy altas de dureza a la vez de ser bastantes ligeros, no deben superar los 1800 g. de peso. Es muy importante que cada persona utilice un casco de su talla.

Al ser el rally un deporte con vehículos cerrados la norma permite la utilización de cascos abiertos o cerrados como muestran las ilustraciones 4 y 5. Pero se distinguen de los cascos convencionales en que llevan incorporado un sistema de intercomunicación ya que el piloto y el copiloto tienen que estar continuamente hablando para dar los detalles del trazado.



Ilustración 4 - Casco abierto



Ilustración 5 - Casco cerrado

### 1.2.2 HANS

La norma FIA Standard 8858-2002, con referencia bibliográfica [6] recoge todo lo referente a los HANS.

Un sistema de seguridad HANS consiste en un collarín diseñado para reducir considerablemente las lesiones en el cuello de los pilotos en el caso de una desaceleración brusca en una colisión o en choques laterales, evitando que la cabeza golpee con el habitáculo del vehículo. El HANS engancha el casco y el respaldo del asiento mediante cinturones y enganches. Las partes que lo forman se pueden observar en la ilustración 6:



Ilustración 6 - HANS



1. Dispositivo de seguridad HANS.
2. Tirantes (uno a cada lado).
3. Clip (uno a cada lado).
4. Soporte de hombros.

El HANS se fabrica principalmente de fibra de carbono puesto que debe ser resistente y ligero para comodidad de la persona y pesa entre 500 y 600 gramos. Cada componente debe estar homologado por la norma FIA Standard 8858-2002, referencia [6], al igual que el conjunto HANS, para ello se hacen una serie de ensayos explicados en la norma.

Fue inventado en 1980 por el estadounidense Robert Hubbard, pero se hizo obligatorio a partir de 2001 en la Formula 1 y en el WRC. Desde entonces gracias a este componente de seguridad muchos pilotos han salvado la vida en accidentes que antes de esta implantación hubieran ocasionado lesiones muy graves de cuello o incluso la muerte. Un ejemplo fue el accidente de Fernando Alonso en el Gran Premio de Brasil en 2003, donde colisionó contra un muro a 200 Km/h y gracias al HANS sólo sufrió un dolor en la pierna.



Ilustración 7 - HANS de Nico Rosberg

### 1.2.3 ROPA IGNÍFUGA

Regido por la norma FIA Standard 8856-2000 con referencia bibliográfica [9].

Esta norma recoge el diseño y las características que deben tener las prendas que llevan los conductores y pilotos de coches de rally. También incluye los métodos de prueba que debe soportar esta indumentaria contra el calor y las llamas para su homologación. Esta norma es aplicable a las prendas exteriores como son el mono, botines y guantes; pero también para la ropa interior como calzones, camiseta, calcetines y sotocasco. Todas estas prendas de vestir se pueden observar en la ilustración 8.



Ilustración 8 - Ropa ignífuga

Estas prendas de vestir son lo único que protegen al cuerpo del piloto y copiloto del calor y las llamas. Otra de sus funciones es mantener la temperatura del cuerpo por debajo de 39°C porque a partir de este valor se empieza a sentir fatiga; de aquí, que algunos monos lleven sistema de refrigeración. El material que se utiliza para confeccionar esta ropa ignífuga es Nomex (derivado de la aramida). Pueden soportar una exposición directa al fuego de unos 30 segundos.

#### 1.2.4 ASIENTOS DE COMPETICIÓN TIPO BAQUET

Regido por la norma FIA 8855-1999 con referencia bibliográfica [5].

El tipo de asiento más común y efectivo para esta competición es el baquet, ilustración 9. Su función principal es proteger a los ocupantes, sujetar firmemente el cuerpo al asiento durante el transcurso de las pruebas de competición y evitar daños en caso de accidente. Son muy efectivos en caso de vuelco. Van acompañados de cinturones de seguridad tipo arnés, todo lo referente a los cuales se definirá en el punto 1.2.5. Para su homologación, aparte de cumplir con las características que define esta norma, deben lograr pasar una serie de pruebas dinámicas que también se recogen en este artículo de la norma FIA.



**Ilustración 9 - Asiento de competición tipo BACQUET**

Es muy importante que el asiento esté perfectamente anclado a la base del vehículo para que en caso de accidente no se mueva ni salga despedido. El respaldo del asiento no debe estar inclinado más de  $30^\circ$  de su posición vertical y el reposacabezas trasero debe estar en posición vertical.

La vida de un asiento homologado por la FIA es de 10 años después de su fecha de fabricación. Menos los asientos dañados en caso de accidente que deben ser retirados inminentemente.

### **1.2.5 ARNÉS DE SEGURIDAD**

Regido por la norma FIA 8853/98 con referencia bibliográfica [8].

Los vehículos de competición llevan arnés de seguridad en lugar de cinturón de seguridad. Su función es evitar que el cuerpo del piloto o copiloto se separe del asiento en caso de accidente. Están formados por 5 o 6 correas, dependiendo si es de 5 o 6 puntos, y un cierre de apertura rápida. Consiste en dos tirantes, un cinturón pélvico y una o dos correas de entrepiernas. El cierre puede ser de dos tipos: tipo P (pulsador) o tipo T (hebilla); pero en ambos casos de color rojo para diferenciarlo del resto de partes del arnés. La vida de este componente es de 5 años después de su fecha de creación.



Ilustración 10 - Arnés de seguridad

### 1.2.6 ARCO DE SEGURIDAD

La norma que rige todo lo referente a los arcos de seguridad es el artículo 253-2012 *“Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)”* del Anexo A de la referencia bibliográfica [16]. Los arcos de seguridad consisten en una estructura multitubular instalada en el interior del habitáculo del vehículo y muy cerca de la carrocería. Estas estructuras han evolucionado considerablemente desde su origen, llegando a conjuntos de barras con una ingeniería muy avanzada.

Su función principal es la de salvaguardar la integridad física de los ocupantes en caso de accidente, pudiéndose deformar la estructura pero sin llegar a dañar a las personas del interior del vehículo. Pero también sirve para mejorar la rigidez del coche dando mayor estabilidad en el paso por curva mejorando tiempo en la carrera y evitando balanceos bruscos del coche.





Ilustración 11 - Arco de seguridad

Existen dos tipos de arcos de seguridad dependiendo del tipo de unión de las barras:

- **Arcos de seguridad atornillados (ilustración 12):** Fácilmente montables y desmontables debido a tener tornillos. Pero poco resistentes debido a que en caso de accidente estas juntas se pueden romper y doblarse muy fácilmente. Son bastante económicos.



Ilustración 12 - Arco de seguridad atornillado

- **Arcos de seguridad soldados (ilustración 13):** Son estructuras más rígidas que las atornilladas en caso de accidente, por lo tanto, también son más caras. La mayor parte de los vehículos que compiten en carreras importantes montan este tipo de estructuras.



**Ilustración 13 - Arco de seguridad soldado**

A lo largo de la historia de los rallyes se han vivido muchos episodios de accidentes graves en los que piloto y copiloto han salvado sus vidas gracias a estas estructuras de seguridad. Un ejemplo es el accidente que sufrió el finlandés Jari-Matti Latvala en el Gran Premio de Portugal de 2009, en el cual el vehículo dio numerosas vueltas de campana mientras el coche descendía la ladera de una montaña. El vehículo quedó bastante dañado como muestra la ilustración 14, pero la estructura de seguridad no sufrió deformaciones excesivas resultando que los ocupantes salieron ilesos.



Ilustración 14 - Accidente Latvala

## 2 OBJETIVOS

El principal objetivo del proyecto es estudiar cómo reacciona un arco de seguridad de un vehículo de competición cuando se realizan los pertinentes ensayos para su homologación. En primer lugar se elegirán los componentes de la estructura y el material del diseño de acuerdo al artículo 253-2012 *“Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)”* del Anexo A de la referencia bibliográfica [16]. Posteriormente este diseño se implementará con los programas *Ansys Mechanical APDL* y *CATIA V5 R21*, con los cuales también se simularán los ensayos descritos en el anexo B de la referencia bibliográfica [14] para su homologación y posible comercialización del producto.

Cuando el diseño haya sido analizado se discutirán los resultados comparándolos con las restricciones impuestas por el documento de la referencia [14]. En el caso de que la estructura cumpla todos los requisitos se dará por válido el diseño, pero en el caso de que no cumpla se buscarán y analizarán las mejores soluciones para perfeccionar el modelo.

Para realizar los diseños se emplearán tres tipos de elementos debido a que la utilización de cada uno es específica para unas clases de modelos determinados. Los elementos de trabajo serán Beam, Shell y Sólido; teniendo cada uno unas características geométricas diferentes. Por lo tanto, otro objetivo del proyecto es comparar como trabaja cada tipo de elemento y estudiar con qué elemento se puede trabajar al tener un diseño específico.

Otro objetivo del proyecto es explicar cómo se han modelizado y calculado los diseños de la estructura en los programas de diseño y cálculo de elementos finitos *Ansys Mechanical APDL* y *CATIA V5 R21*. Por otro lado, también se van a comparar los resultados arrojados por ambos, puesto que al trabajar de manera diferente los resultados serán parecidos pero no iguales.

Y por último, se realizará un estudio económico para comparar costes con una estructura comprada a un proveedor. Se analizará si el diseño final que se ha creado puede competir en el mercado cotejando características funcionales y económicas.

### 3 REQUISITOS DE LA ESTRUCTURA SEGÚN NORMATIVA

A la hora de diseñar la estructura del arco de seguridad se deben tener en cuenta los requisitos geométricos que impone el artículo 253 – 2012 *“Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)”* del anexo A de la referencia bibliográfica [16]. Todos los componentes que se incluyan que no estén especificados en dicho anexo repercutirán en que la estructura no cumpla las normas descritas para su homologación. En el interior de la referencia [16] se pueden encontrar los requisitos impuestos para diseñar la estructura, características geométricas de los componentes y el tipo de material que se puede utilizar para su fabricación. Por lo tanto es interesante dividir el capítulo en tres grandes apartados donde se pueden observar todas las opciones que permite la referencia [16] y para tener todos los datos muy presentes a lo largo del proyecto.

#### 3.1 REQUISITOS APARA REALIZAR EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

Como se puede observar en el punto *“8.3 ESPECIFICACIONES”* dentro del artículo 253 – 2012 *“Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)”* del anexo A de la referencia bibliográfica [16], se debe separar el diseño de la estructura en dos grandes grupos. El primero se refiere a la disposición de las barras de la estructura básica y el segundo a un gran conjunto de componentes obligatorios que se incluyen dentro de la estructura básica. Después hay un punto que indica los miembros opcionales que se pueden introducir en la estructura, pero esto se tratará a lo largo de la realización de los cálculos del diseño si se necesita su utilización. Para no perder detalle de la geometría del arco de seguridad se va a estudiar por separado cada conjunto.

##### 3.1.1 TIPOS DE ESTRUCTURA BÁSICA

Dentro del apartado *“8.3.1. ESTRUCTURA BÁSICA”* del artículo 253 – 2012 *“Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)”* del anexo A de la referencia bibliográfica [16], se pueden encontrar los tres tipos de diseños de estructuras básicas que se propone, a partir de los cuales se empieza a realizar el estudio. La elección de esta estructura es muy importante puesto que con cada tipo se deben utilizar unas características geométricas diferentes. Los tres diseños son los siguientes:

- 1 arco principal + 1 arco delantero + 2 miembros longitudinales + 2 tirantes traseros + 6 pies de anclaje (ilustración 15).



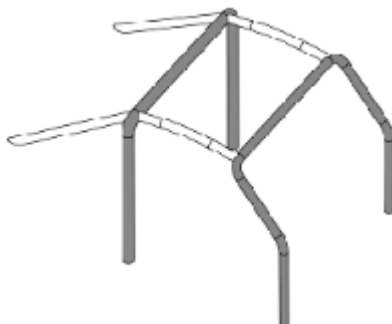


Ilustración 15 - Opción A

- 2 arcos laterales + 2 miembros transversales + 2 tirantes traseros + 6 pies de anclaje (ilustración 16).

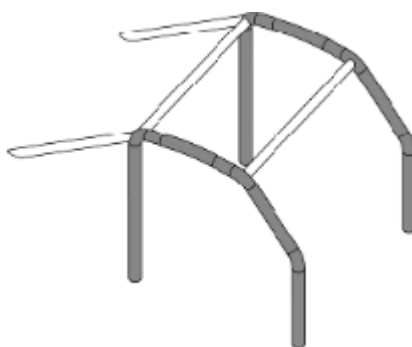


Ilustración 16 - Opción B

- 1 arco principal + 2 semiarcos laterales + 1 miembro transversal + 2 tirantes traseros + 6 pies de anclaje (ilustración 17).

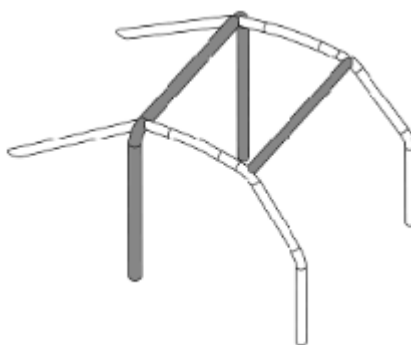


Ilustración 17 - Opción C

### 3.1.2 TIPOS DE MIEMBROS Y TIRANTES OBLIGATORIOS

Para reforzar la estructura básica, el anexo A, con referencia bibliográfica [16], dispone de un apartado “8.3.2.1 Tirantes y refuerzos obligatorios” donde se observan los diferentes tipos de refuerzos que se deben incluir dependiendo del año de homologación del vehículo. Cada componente dispone de unas características propias geométricas y de montaje que se estudiarán en el capítulo del proyecto donde se explicarán los refuerzos elegidos.

- **TIRANTE DIAGONAL**

Este tipo de refuerzo se divide en dos conjuntos de diseño dependiendo de si el vehículo se ha homologado antes o después del 01/01/2012. Para los vehículos homologados después de dicha fecha pueden incorporar los refuerzos de la ilustración 18.

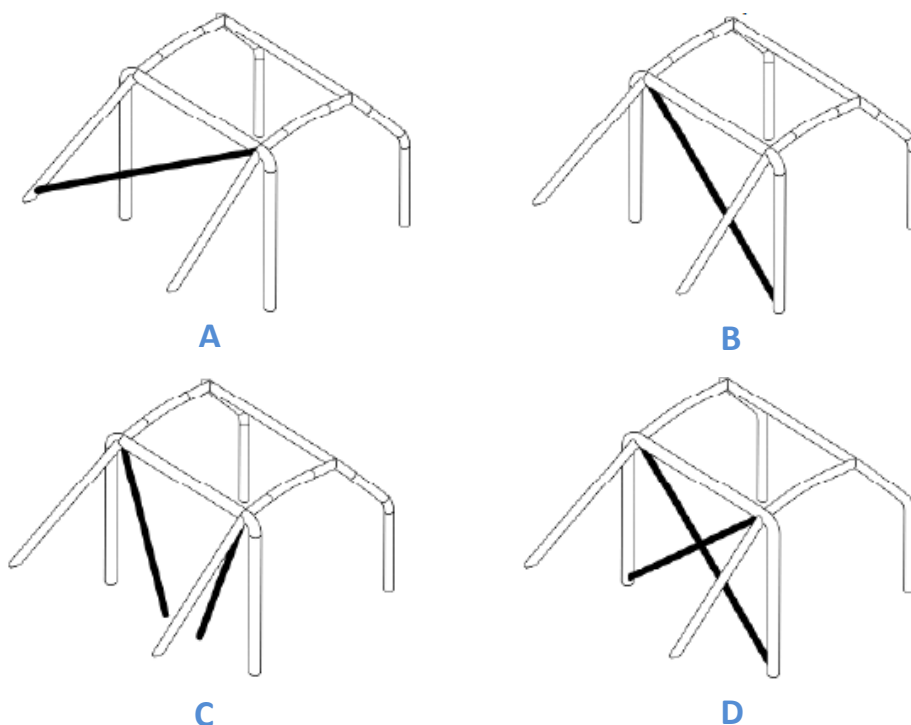


Ilustración 18 - Tipos de tirantes diagonales

- **TIRANTES DE PUERTA**

Estos componentes refuerzan las dos puertas que posee un vehículo. Son obligatorios para vehículos homologados después del 01/01/2007, por lo tanto se deben incorporar al diseño la de la estructura. Las opciones que se presentan se visualizan en la ilustración 19.

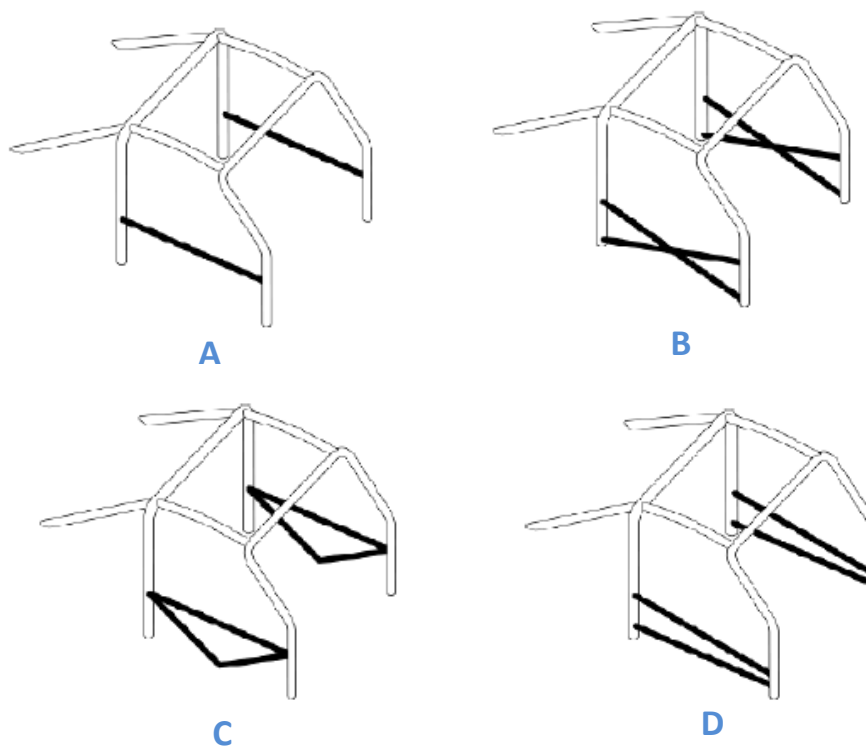


Ilustración 19 - Tipos de tirantes de puerta

- **ELEMENTOS DE REFUERZO DE TECHO**

Son refuerzos obligatorios para vehículo homologados después del 01/01/2005. También se deben tener en cuenta para el diseño de la estructura. Estos miembros cubren la parte del techo del vehículo. Las opciones están en la ilustración 20.

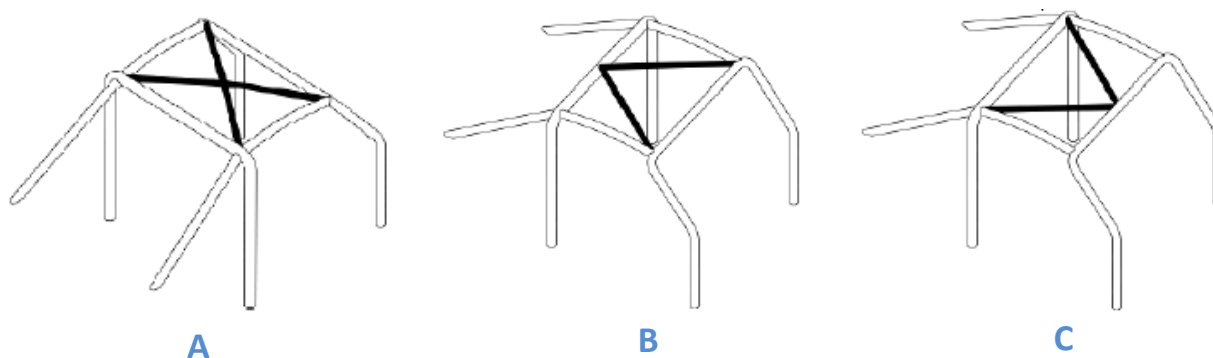
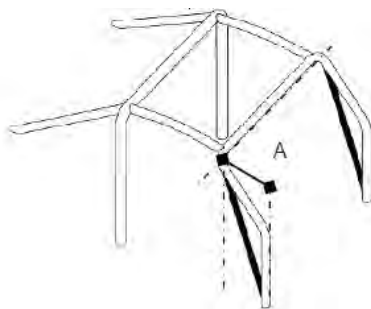


Ilustración 20 - Tipos de elementos de refuerzo de techo



- **PILAR DE REFUERZO DEL PARABRISAS**

Refuerzos obligatorios para el actual diseño puesto que es un requisito indispensable para homologar vehículos después de la fecha 01/01/2006. Sólo hay una propuesta de diseño para este refuerzo, por lo tanto, más adelante se describirá que geometría deben tener, ilustración 21.



**Ilustración 21 - Tipo de refuerzo del parabrisas**

### **3.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS COMPONENTES**

Respecto los valores de longitud de las barras, el artículo 253 – 2012 “*Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)*” del anexo A de la referencia bibliográfica [16] deja total libertad, puesto que dependen del tipo de vehículo para el que se quiere diseñar el arco de seguridad. Pero en lo referente a la sección de los tubos de la estructura, dicho artículo 253 – 2012 “*Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)*” impone que deben ser barras de sección circular y con unas determinadas condiciones geométricas que se especifican en el apartado “*8.3.3 Especificaciones del material*”. Estas restricciones varían en función del tipo de estructura básica que se haya elegido, por eso, una vez seleccionado con qué distribución de barras se va a trabajar, se pueden tener estos datos. En la ilustración 22 se observan los valores mínimos de los que se pueden disponer.

Dimensiones mínimas (mm)	Utilización
45 x 2,5 (1.75"x0.095") o 50 x 2,0 (2.0"x0.083")	Arco principal (Dibujos 253-1 y 253-3) o arcos laterales, y miembros transversales traseros (Dibujo 253-2) según la construcción
38 x 2,5 (1,5"x0.095") o 40 x 2,0 (1,6"x0.083")	Semiarcos laterales y otras partes de la estructura de seguridad (a menos que se especifique otra cosa en los artículos anteriores)

**Ilustración 22 - Requisitos geométricos de la sección**

### 3.3 REQUISITOS DEL MATERIAL

Estos requisitos se encuentran en el apartado “8.3.3 Especificaciones del material” dentro del artículo 253 – 2012 “Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)” del anexo A de la referencia bibliográfica [16]. Indica que debe ser “un acero al carbono no aleado conformado en frío sin soldadura conteniendo un máximo del 0,3% de carbono”. Y la resistencia mínima a la tracción del material debe ser 350 N/mm<sup>2</sup>.

## 4 TIPOS DE ENSAYOS

Para que un arco de seguridad se pueda homologar debe pasar unos análisis que están recogidos en el anexo B con referencia bibliográfica [14], escrito por la FIA. En este trabajo se ha realizado el cálculo con el programa Ansys. Con estas simulaciones se demuestra que la estructura soporta unas determinadas cargas estáticas, la deformación bajo carga se encuentra dentro de unos límites y que no se produce rotura. A continuación se explica en qué consisten ambos ensayos:

- **Ensayo 1: Carga tridimensional sobre arco delantero**

La estructura completa debe soportar una carga estática de valor  $3,5 \cdot p$  daN, donde  $p$  es el peso del coche más 150 kg; aplicada en la parte superior del arco delantero, en la intersección con el miembro transversal y en el lado del piloto. Esta carga forma  $25^\circ$  en el plano YZ y  $5^\circ$  en el plano XY. En el arco de seguridad completo no se debe producir rotura, ni una deformación superior a 100 mm en la dirección en la que se aplica la fuerza.

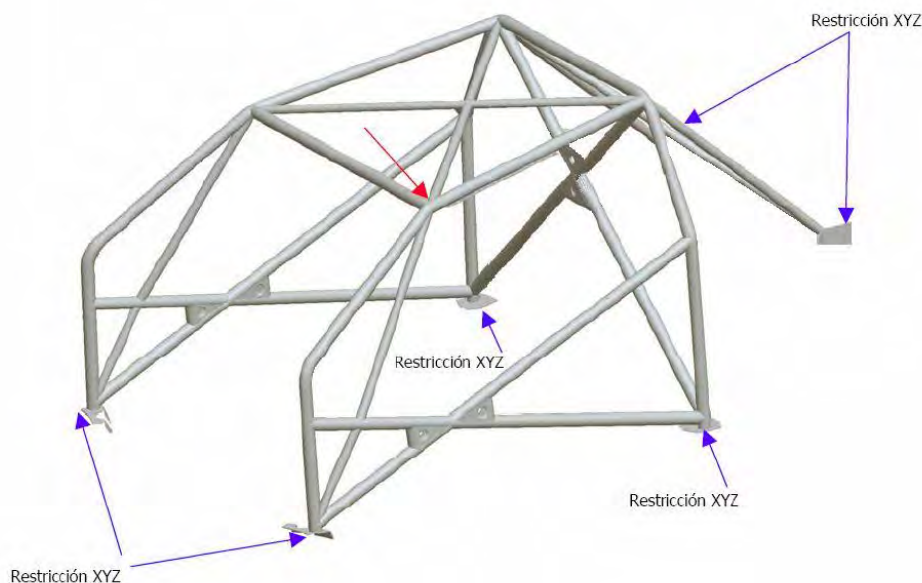
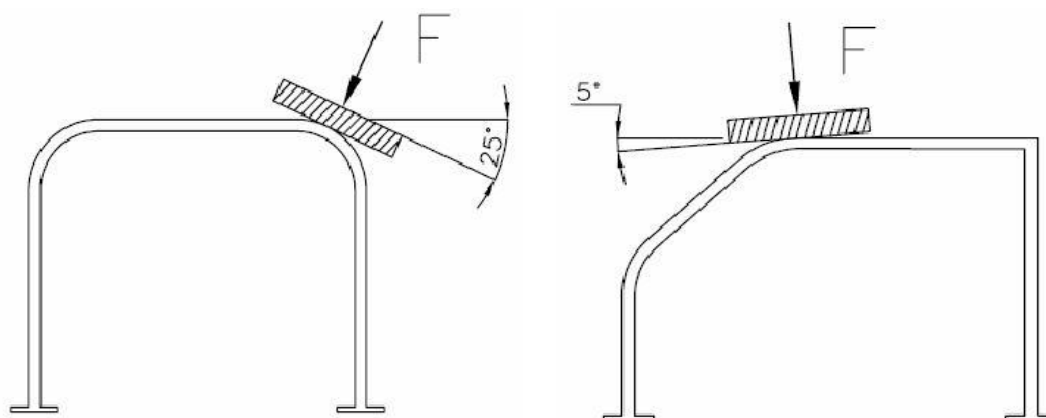


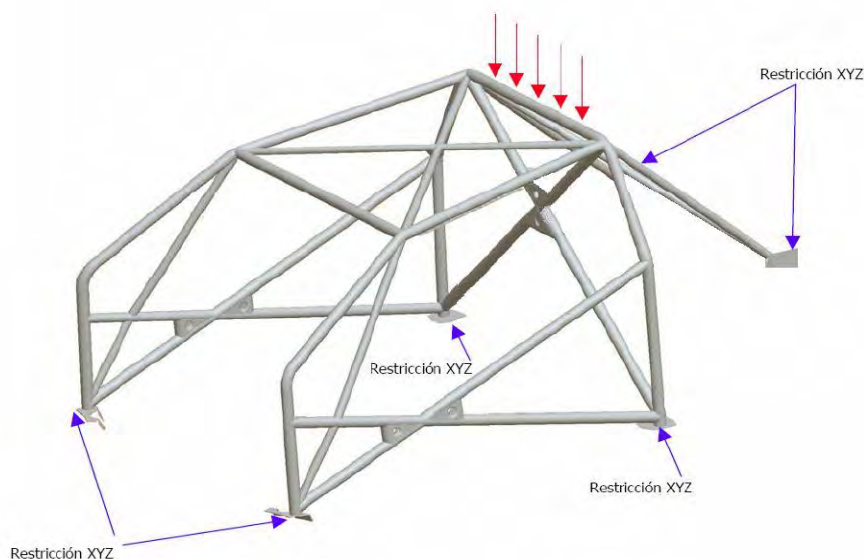
Ilustración 23 - Ensayo 1



**Ilustración 24 - Carga en el plano YZ y XY respectivamente**

- **Ensayo 2: Carga vertical sobre arco principal**

La estructura completa debe resistir una carga estática vertical de valor  $7,5 \cdot p$  daN, donde  $p$  es el peso del coche más 150 kg, aplicada en la parte superior del arco principal, ilustración 25. En el arco de seguridad completo no se debe producir rotura, ni una deformación superior a 50 mm, medidos bajo el eje de aplicación de la fuerza.



**Ilustración 25 - Ensayo 2**

Estos ensayos se utilizarán para analizar la estructura antivuelco que se modelizará en capítulos posteriores. Se obtendrá el lugar y el valor de las tensiones máximas y de las deformaciones máximas. Si los valores obtenidos de las tensiones y de la deformación son menores que los impuestos por el anexo B con referencia bibliográfica [14], la estructura será aceptada y si son iguales o mayores se deben hacer modificaciones de acuerdo al artículo 253 – 2012 *“Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)”* del anexo A de la referencia bibliográfica [16].

## 5 MATERIAL

El material elegido para realizar el análisis del arco de seguridad es el acero al cromo molibdeno (25CrMo4) o acero AISI 4140, siendo un material de los considerados de alta resistencia. Se ha considerado utilizar este material porque su composición de molibdeno aporta mayor tenacidad y el cromo incrementa la dureza y la resistencia a la corrosión. Las propiedades del material se especifican en la tabla 1 y la composición química en la tabla 2, obtenidos estos resultados de las referencias bibliográficas [3], [15] y [17].

PROPIEDADES FÍSICAS DEL MATERIAL 25CrMo4	
Dureza	275 – 320 HB
Límite elástico	695 MPa
Esfuerzo máximo	900 – 1050 MPa
Elongación mínima	12%
Reducción de área mínima	50%
Densidad	7850 Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	205.000 MPa
Resistencia al impacto	0,7 J/m
Temperatura de fusión	1500°C

Tabla 1 - Propiedades físicas del material 25CrMo4

COMPOSICIÓN QUÍMICA	
Carbono	0,38 – 0,42
Manganeso	0,75 – 1
Silicio	0,2 – 0,35
Azufre	0,04 máx.
Fósforo	0,035 máx.
Cromo	0,8 – 1,1
Molibdeno	0,15 – 0,25

Tabla 2 - Composición química del material 25CrMo4

Como se puede observar el acero al cromo molibdeno (25CrMo4) tiene un límite elástico de 650 MPa, por lo tanto, cumple la limitación de poseer una resistencia mínima a la tracción de 350 MPa. Pero no cumple las condiciones de no ser un componente aleado ni de tener un máximo del 0,3% de carbono. Según estas dos limitaciones impuestas por el artículo 253 – 2012 “*Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)*” del anexo A de la referencia bibliográfica [16], dicho material no valdría. Pero estas indicaciones no son totalmente estrictas, puesto que dicho anexo A ha elegido los materiales con estas características porque son muy fáciles de encontrar en los suministradores de acero. Por este aspecto se ha preferido apostar por un material

con mejores propiedades de dureza que la posibilidad de encontrar suministro de dicho material.

Además otro motivo de la elección es que al obtener información de arcos de seguridad de proveedores con gran fama dentro del mundo del automovilismo, se ha encontrado que también trabajan con este tipo de acero al cromo molibdeno. Como se puede observar en la referencias bibliográficas [12] y [13]. Son estructuras para vehículo de competición cuyo material es el que se ha elegido en este apartado.



## 6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA QUE SE PROPONE

Para diseñar la geometría de la estructura, aparte de seguir el artículo 253 – 2012 *“Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)”* del anexo A de la referencia bibliográfica [16], se ha visitado un taller donde realizan arcos de seguridad para coches de rally de competición. A través de un Renault Clio 2 con unas barras homologadas se ha cogido la geometría del coche y los puntos donde irían anclados los componentes de la estructura. A continuación se pueden observar varias fotos del vehículo y de un ejemplo de barras que el propio taller había diseñado para ese vehículo.



Ilustración 26 - Parte delantera



Ilustración 27 - Parte trasera





**Ilustración 28 - Vehículo completo**

En las imágenes se distingue fácilmente la estructura principal del arco de seguridad y las barras auxiliares que se pueden incluir para evitar golpes laterales y para reforzar el conjunto. Además se ve como la unión de la estructura al vehículo se realiza por medio de soldadura al igual que las uniones entre barras. Todos estos detalles están recogidos en el artículo 253 – 2012 *“Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)”* del anexo A de la referencia bibliográfica [16] y hay que tenerlos muy en cuenta a la hora de realizar el diseño.

En primer lugar, dentro del estudio que se está realizando en este proyecto, se van a citar el tipo de estructura básica y los miembros de refuerzos elegidos.

## **6.1 PROPUESTA DE ESTRUCTURA BÁSICA**

Para realizar el estudio que se lleva a cabo se ha elegido la opción C del capítulo 3.1.1, que se especifica cada parte en la tabla 3. Se ha optado por esta elección debido a que cada conjunto de barras está mejor diferenciado, además para realizar el dibujo simplifica el número de operaciones.

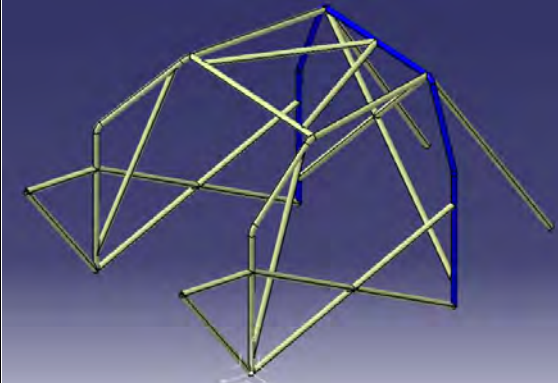
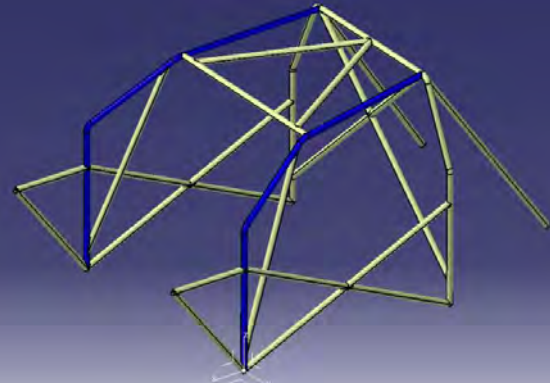
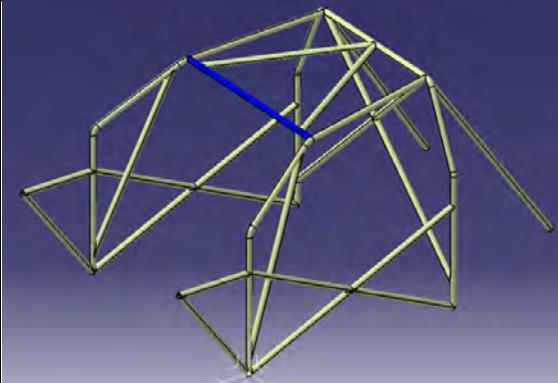
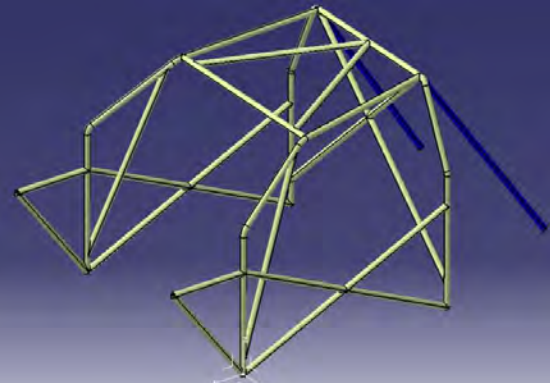
ESTRUCTURA BÁSICA	
ARCO PRINCIPAL	SEMIARCOS LATERALES
	
MIEMBRO TRANSVERSAL	TIRANTES TRASEROS
	

Tabla 3 - Componentes de la estructura básica

El arco principal de la estructura básica debe estar situado en un plano transversal al vehículo, detrás de los asientos delanteros y debe ser de una sola pieza con una inclinación máxima de  $\pm 10^\circ$  respecto la vertical. Debe haber dos semiarcos laterales, uno a la derecha y otro a la izquierda del vehículo, contruidos de una sola pieza y situando los tirantes traseros por detrás de los asientos delanteros. Estos tirantes traseros forman un ángulo de  $30^\circ$  con la vertical como mínimo. La parte delantera de los semiarcos debe seguir la forma del parabrisas. El tirante transversal debe unir los dos semiarcos laterales y debe ser un tubo circular de una sola pieza. Por último, debe haber una placa soldada al final del tubo para que esta última se suelde o se atornille a la estructura del coche. Es muy importante que las uniones superiores del arco principal con los semiarcos laterales y los semiarcos con el tirante transversal se realicen lo más próximas al nivel del techo.

## 6.2 PROPUESTA DE MIEMBROS Y TIRANTES OBLIGATORIOS

Una vez que la estructura básica se ha definido debe ser completada con refuerzos obligatorios.

Como el vehículo se va a homologar después del 01/01/2002, el artículo 253 – 2012 “*Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)*” del anexo A de la referencia bibliográfica [16] obliga a incorporar el refuerzo de la ilustración 29. Las barras diagonales deben ser rectas y unidas al arco principal a una medida menor de 100 mm con el pie de anclaje en la parte inferior y menor a 100 mm de la unión del arco principal y el tirante trasero en la parte superior. Es más recomendable utilizar la opción de la ilustración 29 antes que el resto porque refuerza considerablemente las partes de la estructura donde se unen mayor número de barras. Como estas uniones se hacen con soldadura, dichas partes tienden a debilitarse más que las zonas donde hay barras individuales. Además, la barra que sujeta los extremos superiores de las diagonales interviene directamente en uno de los ensayos para homologar la estructura. Por lo tanto, interesa fortalecer dicha zona.

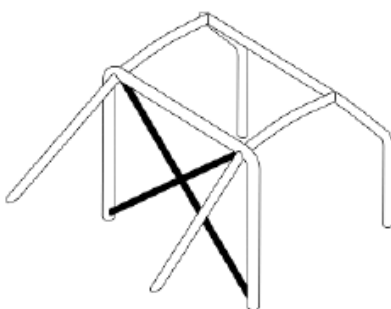


Ilustración 29 - Elección de tirantes traseros

Se debe agregar al diseño un conjunto de barras que una la parte delantera de la estructura con las torretas de los amortiguadores delanteros. Estas barras proporcionan a la estructura dos puntos más de anclaje, por lo tanto, mayor rigidez al vehículo. Este conjunto se pueden observar en la ilustración 30.

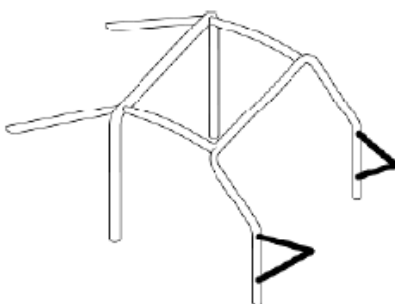
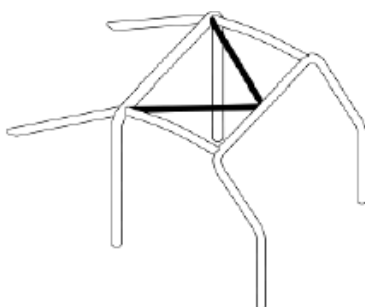


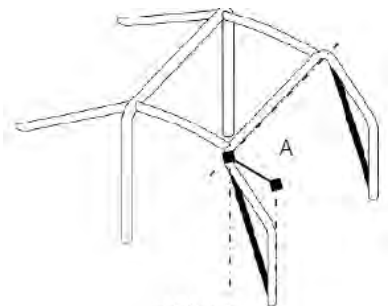
Ilustración 30 - Anclajes delanteros

Otra incorporación es la correspondiente a elementos de refuerzo de techo, ilustración 31. Los extremos de estos refuerzos deben estar a una medida inferior a 100 mm de las uniones entre arcos y miembros. Estos refuerzos pueden seguir la curvatura del techo. Se ha optado por esta opción debido a su forma en “V”. Los extremos más separados ayudan a fortalecer las uniones con mayor número de barras, al igual que los miembros diagonales, y la unión de las dos barras ayuda a disminuir el esfuerzo cortante que tiene el miembro transversal. Otro motivo de esta elección es para disminuir el peso de la estructura puesto que al tener menos peso la estructura resultará más económica.



**Ilustración 31 - Elección refuerzos del techo**

El tercer conjunto de barras que se va a incorporar al vehículo son los pilares que refuerzan el parabrisas, ilustración 32. La función de estas barras es evitar que el vehículo tenga desplazamientos muy grandes en dirección perpendicular al suelo en caso de vuelco. Para el primer estudio que se va a realizar a la estructura van a tener un papel muy importante puesto que van a disminuir notablemente el esfuerzo cortante que van a sufrir los semiarcos laterales. El requisito para montar estos refuerzos es que la dimensión A, mostrada en la ilustración 32, sea mayor a 200 milímetros y en este caso sí es superior. Respecto a su geometría, su extremo superior debe estar a menos de 100 milímetros de la unión entre el semiarco lateral y el miembro transversal. Su extremo inferior debe situarse a menos de 100 milímetros del pie de anclaje delantero del semiarco.



**Ilustración 32 - Refuerzo del parabrisas**

Por último, a la estructura se le incluyen los tirantes en las puertas de la ilustración 33. Este conjunto de barras apenas disminuye el esfuerzo cortante de las barras pero es muy positivo desde el punto de vista torsional para el vehículo, es decir, mejora el paso por curva del coche a la vez de su estabilidad. Pero más importante que este punto es el aporte de rigidez que absorbe el vehículo en caso de choque lateral, evitando que los ocupantes del vehículo tengan lesiones muy graves. Se ha elegido dicha opción porque al tener forma de “X” fortalece tanto el centro de las puertas como los laterales en caso de accidente. Estas barras deben ser simétricas respecto a la altura de las puertas. Estarán situadas lo más alto posible siempre que sus extremos superiores no superen la mitad de la altura total de la puerta medida desde su base. En el caso específico de este tipo de disposición de barras los extremos inferiores deben estar unidos a los anclajes inferiores de los semiarcos laterales y del arco principal, además de que, uno de los componentes de esta “X” conviene que sea de una sola pieza sin ser seccionada con el segundo componente. Estos complementos de la estructura no serían obligatorios para competiciones en que no hay copiloto, pero la función del vehículo que se está estudiando exige disponer de un copiloto dentro del vehículo.

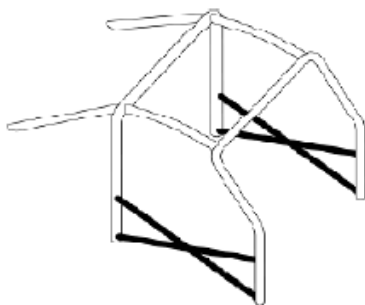


Ilustración 33 - Elección tirantes de puertas

### 6.3 APROXIMACIÓN DEL ESPESOR

Para empezar a trabajar sólo se dispone de unos valores mínimos de diámetro exterior y espesor que impone el apartado “8.3.3 Especificaciones del material” del artículo 253 – 2012 “Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)” del anexo A de la referencia bibliográfica [16] y la distribución de las barras para formar la estructura principal del arco de seguridad. Por lo tanto, antes de realizar los modelos se va a calcular de forma aproximada el espesor mínimo que debería tener la estructura para soportar la carga impuesta por los ensayos explicados en el Anexo B de la referencia bibliográfica [14].

Para llevar a cabo el estudio se elige el ensayo 2: carga vertical sobre arco principal. Se hace la aproximación de sacar la barra horizontal donde se aplica la fuerza del modelo y se representan las uniones de las demás barras con dos apoyos simples, uno a cada extremo. Se eligen apoyos simples porque los extremos de las barras se desplazarán mínimamente en dirección horizontal y vertical, pero sí pueden girar y los apoyos simples tienen restringido los movimientos horizontal y vertical, y permitido el giro. Por lo que se despreciará el movimiento horizontal y vertical de los extremos de las barras para hacer el estudio. La estructura quedaría como muestra la ilustración 34.

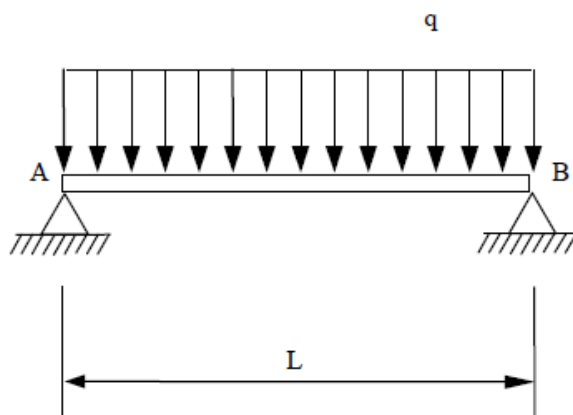


Ilustración 34 - Estructura

Los datos de que disponemos para el estudio son:

- Longitud de la barra.

$$L = 0,88 \text{ m}$$

- q: valor de la carga distribuida vertical por unidad de longitud.

$$q = 7,5 * (\text{peso coche} + 150 \text{ (kg)}) \quad (\text{daN})$$

$$q = 7,5(\text{daN}) * 10 \left( \frac{\text{N}}{\text{daN}} \right) * (1035 + 150)$$

$$q = 88875 \text{ N}$$

Como tiene que ser carga por unidad de longitud:

$$q = \frac{88875 \text{ N}}{0,88 \text{ m}} = 100994,32 \text{ N/m}$$

Restricciones:

$$v_{\text{punto medio}} \leq 0,05 \text{ m}$$

Ecuación 1

Como la estructura solo tiene cargas verticales y en cada extremo de la viga hay un apoyo simple con una reacción vertical, la estructura posee grado de hiperestatismo igual a cero. Por lo tanto se pueden calcular las reacciones por equilibrio de fuerzas. El estudio se llevará a cabo sin sustituir los valores de dimensiones o cargas, esta operación se realizará al final. En cada extremo de la viga A y B se tiene una reacción vertical  $Y_A$  e  $Y_B$ . La carga resultante vertical es la del valor de la carga distribuida vertical por unidad de longitud ( $q$ ) por la longitud de la viga ( $L$ ), por lo tanto será  $q \cdot L$ . Las dos ecuaciones con las que se calculan las reacciones son equilibrio de fuerzas verticales de la viga (ecuación 2) y sumatorio de momentos en el punto A (ecuación 3).

$$Y_A + Y_B = q \cdot L$$

Ecuación 2

$$\sum M_A = 0 ; Y_B \cdot L = q \cdot L \cdot \frac{L}{2}$$

Ecuación 3

De la ecuación 2 se obtiene:

$$Y_B = \frac{q \cdot L}{2}$$

De la ecuación 1 se obtiene:

$$Y_A = \frac{q \cdot L}{2}$$

Una vez que se han obtenido las reacciones se calcula la flecha del punto medio de la viga.

$$\downarrow v_{\text{punto medio}} = \downarrow v_A + \overrightarrow{\theta}_A \cdot L_{A \rightarrow \text{punto medio}} + \frac{\text{Área}_{\text{diagrama } M_f} \cdot L_{A \rightarrow \text{punto medio}}}{E \cdot I}$$

De la ecuación anterior tenemos todos los valores menos la flecha y el giro del punto A. La flecha es cero debido a que en el extremo A hay un apoyo e impide su



desplazamiento vertical, y el giro se obtiene del formulario “Giros y desplazamientos de vigas de un solo tramo” del anexo C con referencia bibliográfica [2].

$$\overrightarrow{\theta}_A = \frac{q * L^3}{24 * E * I}$$

Sustituyendo los valores de cada parámetro en la fórmula y el giro en el extremo A, la fórmula de la flecha del punto medio resulta quedar:

$$\downarrow v_{punto\ medio} = \frac{q * L^3}{24 * E * I} * \frac{L}{2} + \frac{1}{E * I} * \left( -\frac{2}{3} * \frac{q * L^2}{8} * \frac{L}{2} * \frac{3 * L}{16} \right)$$

$$\downarrow v_{punto\ medio} = \frac{q * L^4}{48 * E * I} - \frac{q * L^4}{128 * E * I}$$

$$\downarrow v_{punto\ medio} = \frac{5 * q * L^4}{384 * E * I}$$

A continuación, si se sustituye en la restricción de la ecuación 1 la fórmula de la flecha del punto medio y los valores de la carga distribuida por unidad de longitud (q), el módulo de Young del material (E) y la longitud de la barra (L); se obtiene el valor del momento de inercia (I) de la sección de la barra ensayada. El valor del módulo de Young se obtiene de la “Tabla 1: Propiedades Físicas” del apartado “5. Material”.

$$\frac{5 * q * L^4}{384 * E * I} \leq 0,05$$

$$I \geq \frac{5 * q * L^4}{384 * 0,05 * E}$$

$$I \geq \frac{5 * 100994,32 * (0,88)^4}{384 * 0,05 * 205 \cdot 10^9}$$

$$I \geq 7,69383 \cdot 10^{-8} m^4$$

Por último, se sustituye la fórmula del momento de inercia de un círculo con espesor. Dentro de esta fórmula se toma como valor del radio exterior 0,0225 m y se despeja el radio interior como resultado final. Se opta por escoger 0,0225 m porque la carga se aplica en la barra horizontal del arco principal y según indica el apartado “8.3.3 Especificaciones del material” del anexo A de la referencia bibliográfica [16] dicha barra debe tener como mínimo un radio de 0,0225 milímetros.

$$I = \frac{\pi * R_{ext}^4}{4} - \frac{\pi * R_{int}^4}{4} \geq 7,69383 \cdot 10^{-8}$$

$$R_{int} \leq 0,01995$$

Por lo tanto el espesor valdría como mínimo:

$$e = R_{ext} - R_{int} = 0,0225 - 0,01995 = 0,00255 m$$

El resultado que se ha obtenido de espesor parece muy pequeño para los ensayos que se van a realizar. Por lo tanto se optará por elegir los siguientes valores para situarse del lado de la seguridad:

$$R_{int} = 0,0185 \text{ m}$$

$$e = 0,004 \text{ m} = 4 \text{ mm}$$

En el caso de que se ejecuten los ensayos de la homologación y se cumplan todas las restricciones con el diseño de la estructura elegido, se optará por reducir el valor del espesor para abaratar el coste de materia prima a la hora de su comercialización. Pero de momento se va a trabajar con dichos resultados.

## 7 PLANTEAMIENTO DE MODELIZACIONES Y ANÁLISIS

Cuando se quiere modelizar o analizar una estructura es conveniente estudiar el tipo de modelo que se posee, haciendo hincapié en la geometría de los componentes y de la estructura final. Dependiendo de sus características se debe elegir un tipo de elemento de diseño u otro, debido a la precisión para obtener los resultados. Se puede trabajar con elementos tipo beam, tipo Shell o tipo sólido. A continuación se va a definir la función de cada uno, referencia bibliográfica [10]:

- **Elementos tipo Beam:** Se utiliza con estructuras que poseen una de sus dimensiones mucho mayor que las otras dos, por lo menos 10 veces más grande. Este dato se puede observar en la referencia [10] Se dibujan los elementos con una línea dando sólo su longitud en el dibujo. Y como propiedades de la sección se aportan el momento de inercia del área, el momento de inercia torsional y el área transversal. Los perfiles de estructuras comunes que se utilizan elementos tipo beam son: sección I, sección T, caja, circular y canales.
- **Elementos tipo Shell:** Se emplea con estructuras que tienen un espesor muy pequeño en comparación con las otras dos dimensiones y también con estructuras de chapa. Se dibuja el perímetro de la pieza por medio de áreas, por lo tanto, se aportan dos dimensiones; y como dato de geometría el valor del espesor.
- **Elementos tipo Sólido:** Consiste en un diseño en el que se utilizan volúmenes aportando como datos al dibujo las tres dimensiones del elemento, es decir, se indica altura, anchura y longitud. Con este tipo de elemento se puede diseñar todo tipo de estructura. Es el modelo más empleado cuando se trabaja con programas CAD.

La estructura que se va a diseñar en este proyecto es un arco de seguridad y consiste en un conjunto de barras circulares unidas por soldadura formando una geometría específica. En estas barras predomina su longitud frente al ancho y el canto; por lo tanto, para hacer el diseño se utilizarán elementos tipo Beam.

### 7.1 ELEMENTOS TIPO BEAM

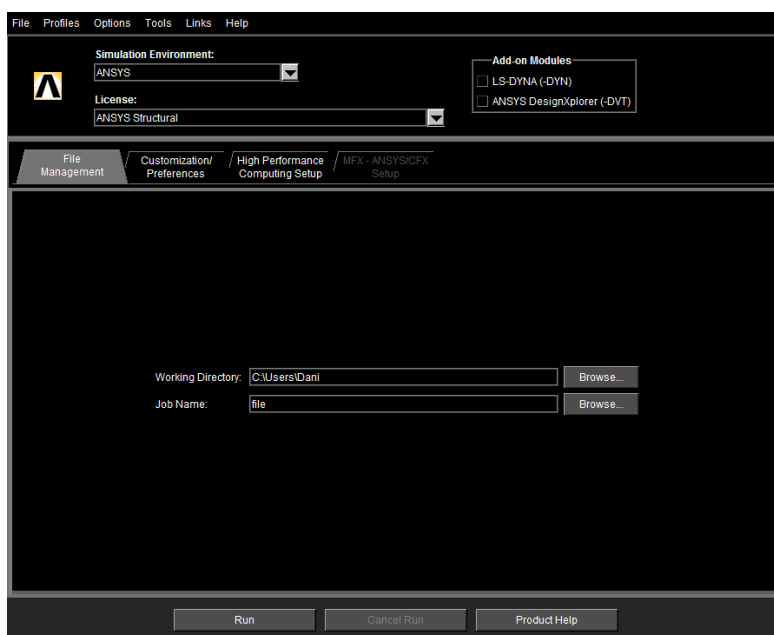
Como se ha comentado en el punto anterior “7 Planteamiento de modelizaciones Y análisis”, se va a trabajar con elemento tipo Beam puesto que se tienen barras circulares. Para realizar este primer ensayo se utiliza el programa Ansys

*Mechanical APDL*, que es un módulo de *Ansys*. Se dibujaran todos los elementos mediante líneas con las dimensiones que se obtuvieron en la visita al taller que se comentó anteriormente.

### 7.1.1 MODELIZACIÓN

En este apartado se explicará paso por paso cómo se ha ido haciendo el diseño de la estructura, para que quién no haya utilizado nunca este programa se familiarice con los comandos que dispone.

En primer lugar se abre *Ansys Mechanical APDL Product Launcher* y aparece una ventana, ilustración 35, que muestra una serie de opciones de inicio de los diferentes apartados que dispone el programa. Para el proyecto se selecciona *ANSYS Structural* en el apartado *License*, se elige el directorio donde se guardarán los documentos y por último ejecutar en *Run* para que salga la pantalla de trabajo.



**Ilustración 35 - Ventana inicio de Ansys Mechanical APDL**

La siguiente imagen que aparece ya es la ventana de trabajo donde están todas las opciones que se tienen de diseño y análisis, ilustración 36. A la izquierda de la pantalla se encuentran las herramientas de selección y a la derecha las herramientas de visualización. Estas opciones también se encuentran en la barra de menús horizontal, aparte de muchas otras herramientas que se utilizarán posteriormente. En el centro de la imagen aparece la ventana de visualización donde se sitúa todo lo que se va ejecutando a lo largo del modelo y se puede observar en el centro los ejes coordenados iniciales del programa.

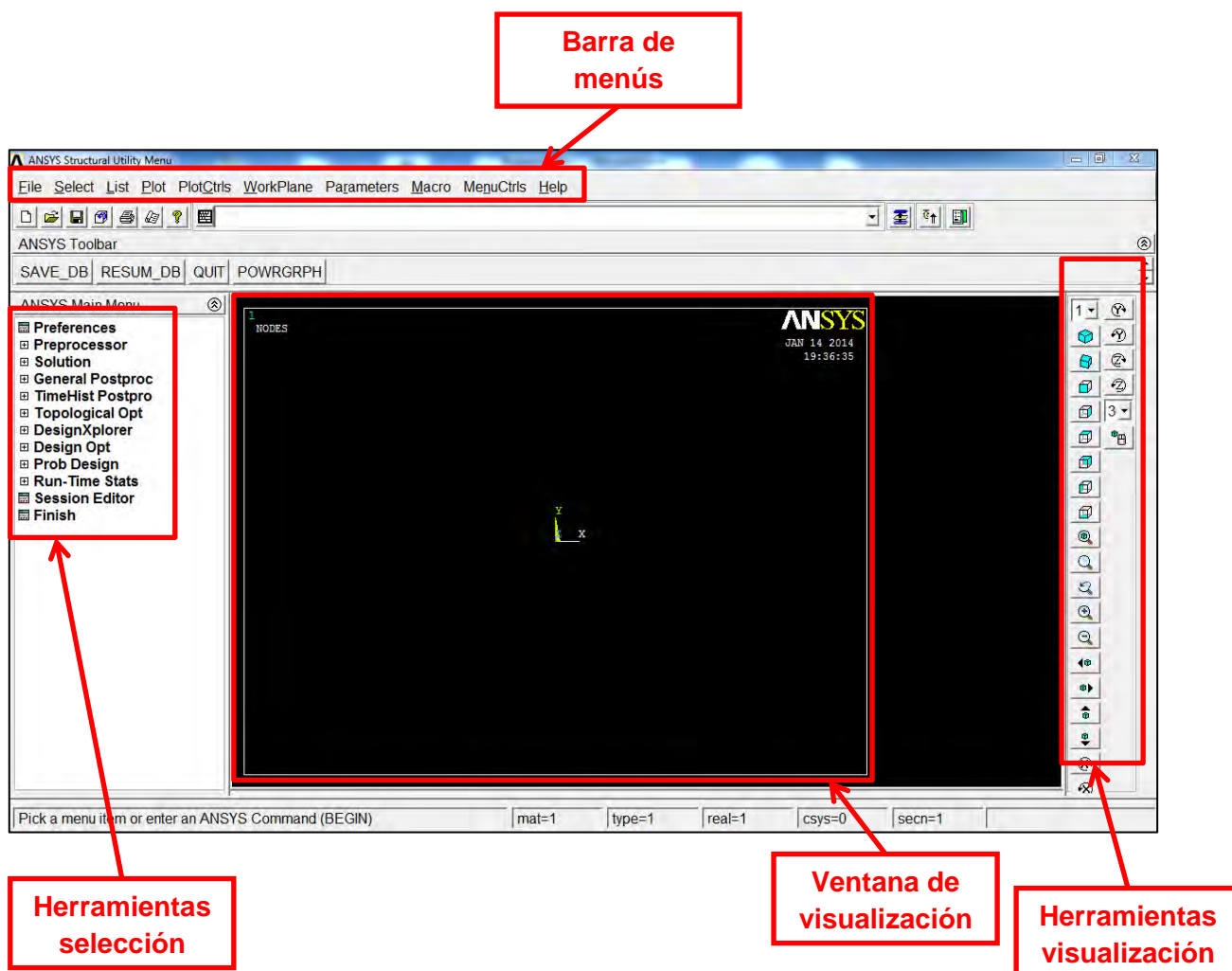


Ilustración 36 - Ventana de trabajo

Primeramente se va a construir el arco principal de la estructura completa. Se empieza a realizar la estructura introduciendo keypoints, por medio de coordenadas, en el principio y final de las barras circulares que lo forman. Para introducir keypoints por medio de coordenadas pulsar en Preprocesor/ Modeling/ Create/ Keypoints/ In active CS. Sale una ventana donde se introducen las coordenadas de cada punto.

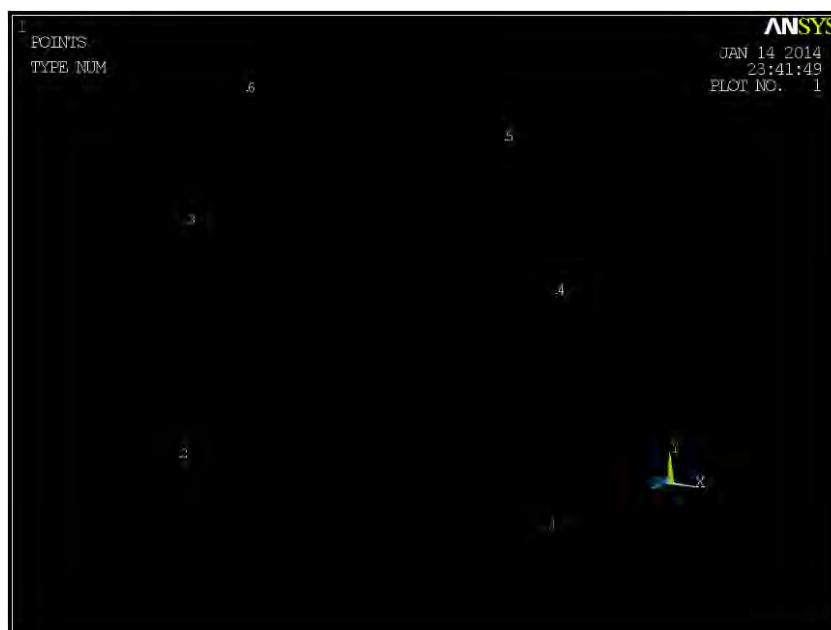


Ilustración 37 - Keypoints del arco principal

Una vez que se han introducido los keypoints por coordenadas, se tienen que unir con líneas que representan las barras circulares de la estructura. Para incluir las líneas se pulsa en Preprocesor/ Modeling/ Create/Line/ Straight line, se seleccionan los dos keypoints como principio y fin de la línea y aparece el resultado. Se tiene que realizar este procedimiento con las 5 líneas que forman el arco principal. Una vez creadas las líneas el programa muestra en pantalla los keypoints y las líneas que se han formado y cada componente con su nombre como muestra la ilustración 38.

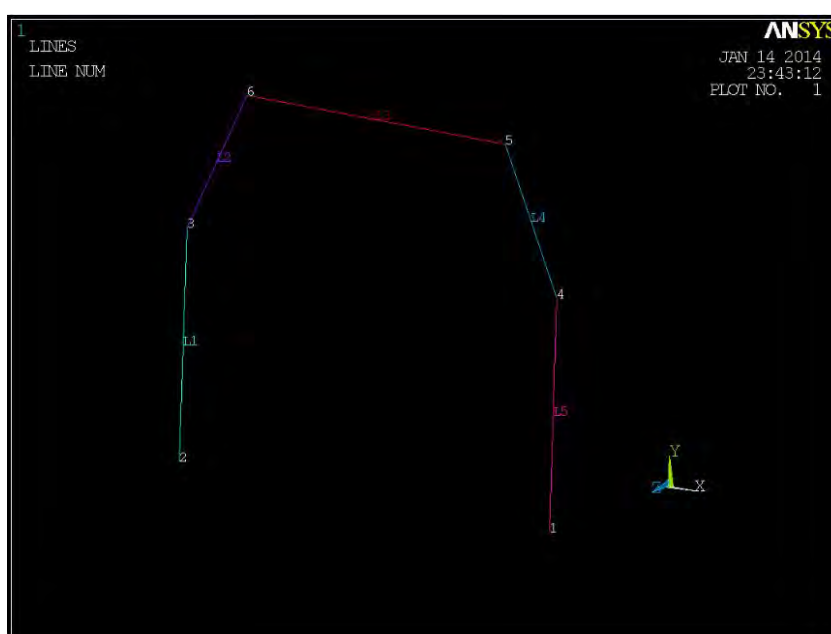


Ilustración 38 - Keypoints y líneas del arco principal

En la ilustración 39 se muestra que las uniones de las líneas 1-2 y 4-5 terminan en un keypoint y no debe ser así, puesto que en el modelo entre líneas debe haber una unión curva. Por lo tanto, se debe hacer una línea con un determinado radio de acuerdo. Esto se consigue con Preprocesor/ Modeling/ Create/ Line/Line Fillet, introduciendo a continuación el valor del radio de la línea. Entonces crea en vez del keypoint (KP más adelante) inicial una línea curva con dos keypoints, uno a cada extremo.



Ilustración 39 - Estructura con radios de acuerdo

Ahora se definen los semiarcos laterales por medio del mismo procedimiento. Para crear el semiarco lateral derecho se introducen puntos por coordenadas, se unen los keypoints para crear líneas y en las uniones de las nuevas líneas se crean radios de acuerdos por medio de la herramienta “Line Fillet”. Después se realizan los mismos pasos para el semiarco lateral izquierdo. La estructura parcial se muestra en la ilustración 41.



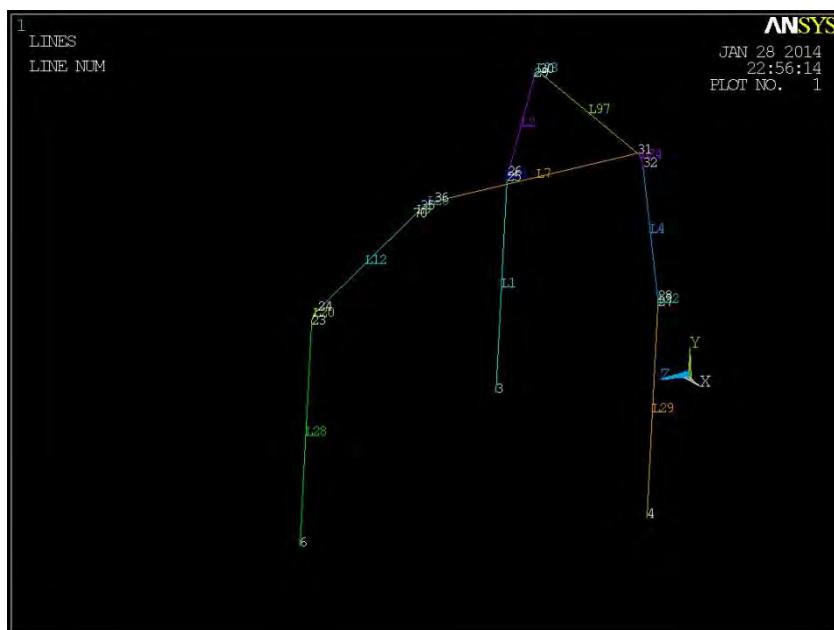


Ilustración 40 - Primer semiarco lateral

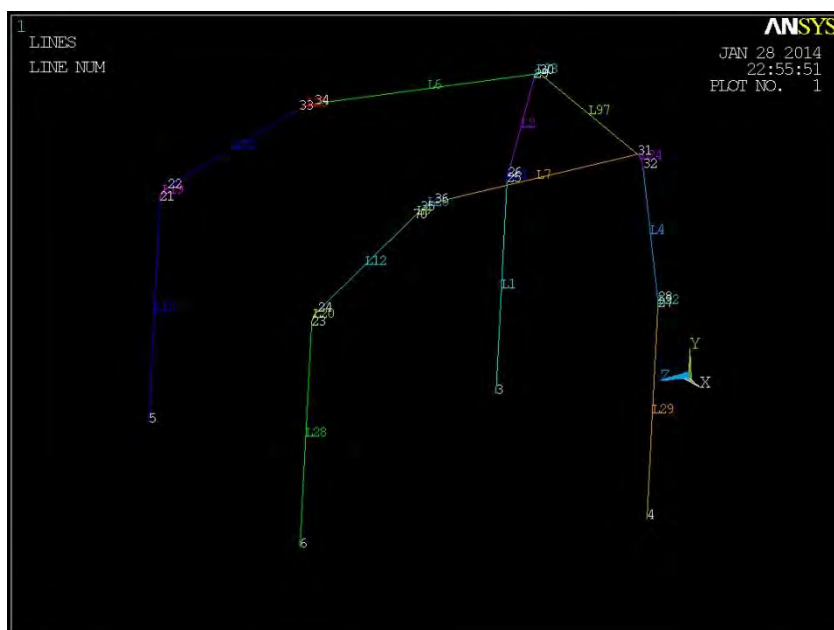


Ilustración 41 - Semiarcos laterales

A continuación se crea el miembro transversal uniendo los dos puntos que se muestran en la ilustración 42. Y por último, para completar la estructura básica se realizan los dos tirantes traseros, uno a cada lado del vehículo. Los puntos de unión de los tirantes con el arco principal se pueden observar en la ilustración 43.

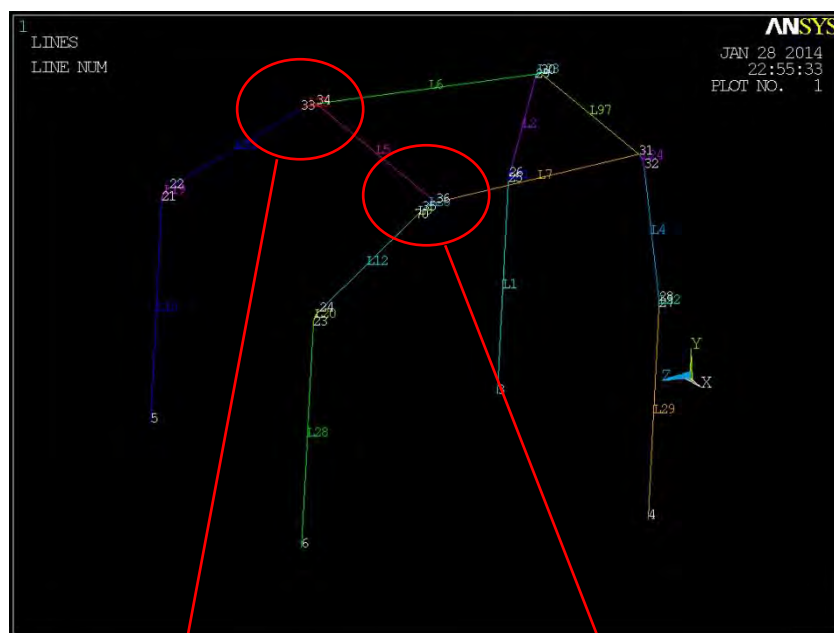


Ilustración 42 - Miembro transversal

Los extremos de los tirantes que van soldados al coche no se han colocado al mismo nivel que los extremos del arco principal, porque dichos extremos van anclados a la parte de la carrocería que hace la forma de las ruedas traseras como se indica en la ilustración 44.

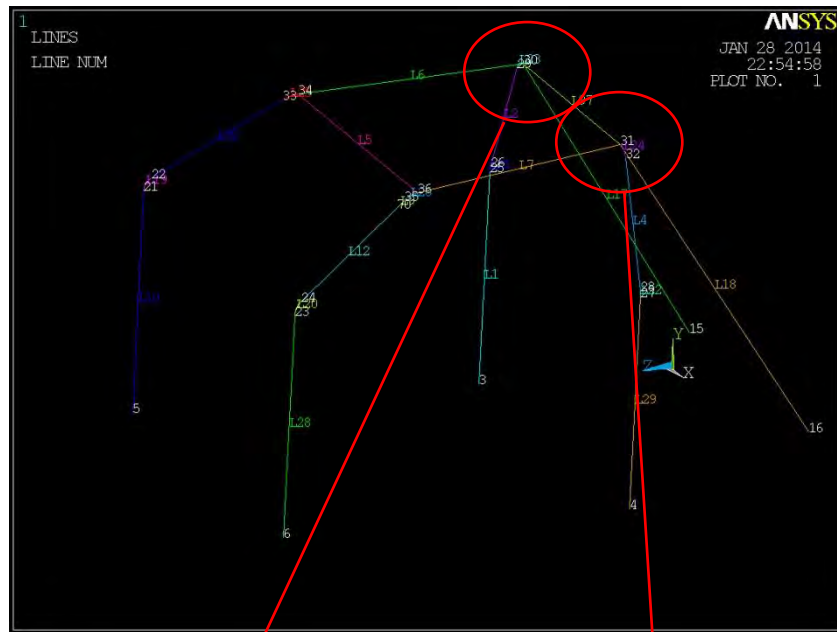


Ilustración 43 - Tirantes traseros



Ilustración 44 - Diferencia de alturas de anclaje

Hasta aquí se ha explicado los pasos a seguir para diseñar la estructura básica del arco de seguridad que se explicó en el apartado “6.1 Propuesta de estructura básica”. A continuación, siguiendo el anexo A de la referencia [16] se van a diseñar el resto de barras opcionales, pero obligatorias para vehículos homologados a partir de 2005. El tipo de barras obligatorias elegidas se puede observar en el apartado “6.2 Propuesta de miembros y tirantes obligatorios”. Recopilando datos, estos componentes extras son: tirante diagonal, elementos de refuerzo de techo, pilar de refuerzo del parabrisas y tirantes de puertas.

Se empieza realizando los tirantes diagonales teniendo en cuenta que sus extremos inferiores deben estar a una distancia menor de 100 milímetros de los anclajes de las barras verticales del arco de seguridad. Como primer paso se va a medir la longitud de las dos barras horizontales del arco de seguridad utilizando la herramienta Preprocessor/ Modeling/ Check geom/ KP distances ilustración 45. Esta opción refleja cuatro distancias entre los dos nodos: distancia total, en el eje X, en el eje Y, en el eje Z. Con la distancia en el eje “Y” se calcula que tanto por ciento equivalen 80 milímetros de la longitud total de la línea y este valor se utiliza para introducir los dos puntos que representan las uniones de los extremos inferiores de los tirantes diagonales con el arco principal. Este dato lo pedirá el programa con el nombre de “ratio” y se deberá introducir el valor de 0 a 1, por ejemplo si el ratio sale 24% se introduce en el programa 0,24.

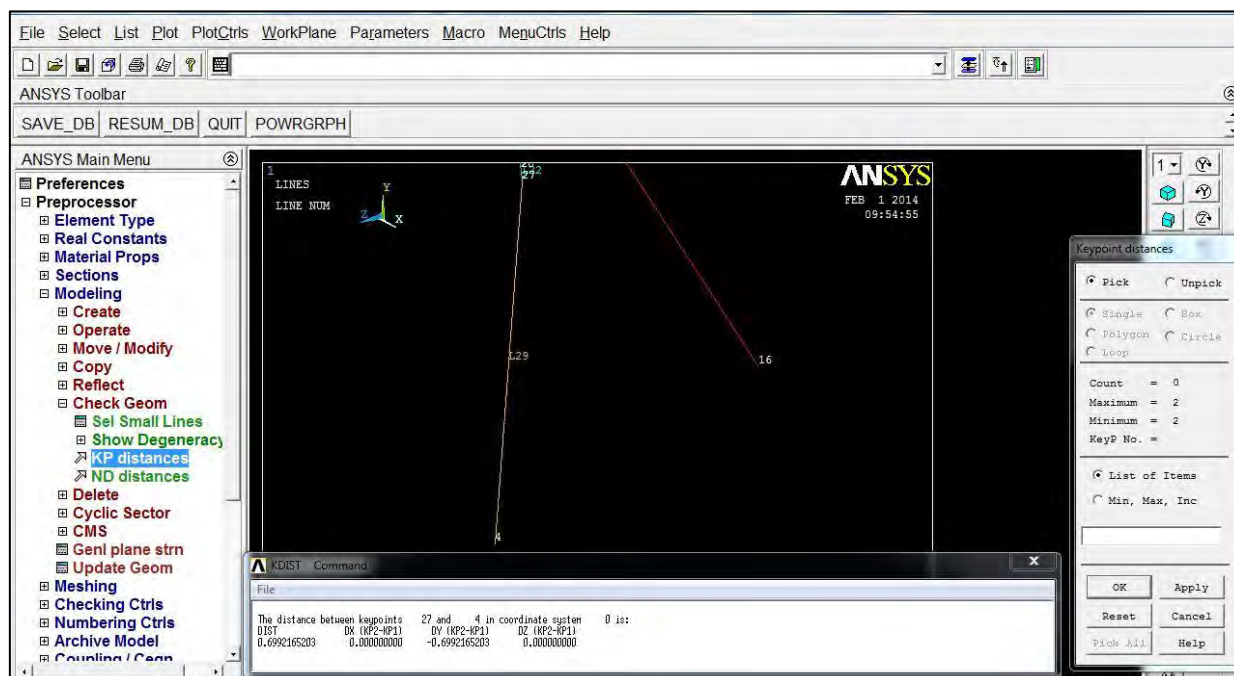
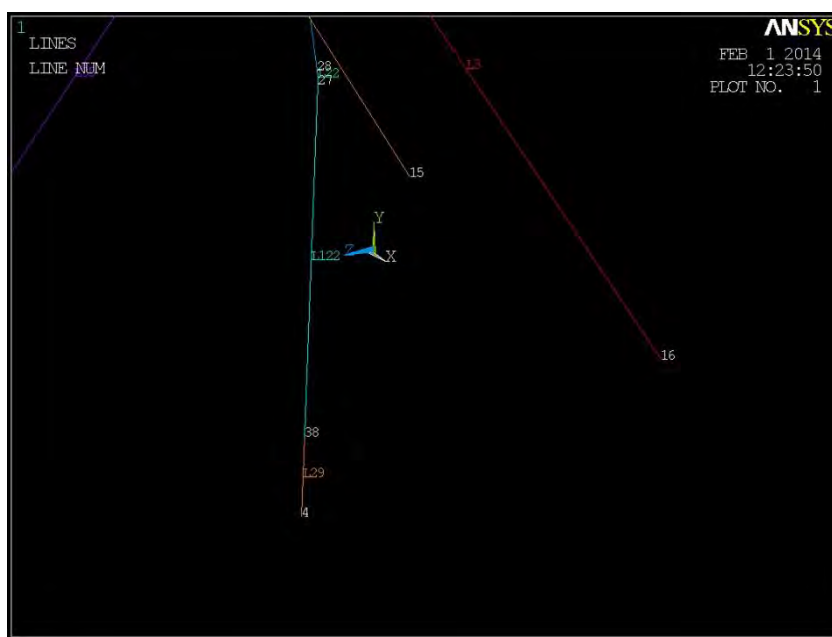


Ilustración 45 - Herramienta Check Geom.

Una vez que se dispone del tanto por ciento que equivalen 80 mm se crean dos puntos por coordenadas que simularán la soldadura entre barras. Para crear dichos puntos se hace visible el “working plane” (WP más adelante) siguiendo la ruta Workplane/ Display Working Plane. Al posicionar el WP en la línea nos va a pedir a que longitud se quiere colocar, que equivale al tanto por cien calculado. Con este sistema de referencia auxiliar en la pantalla hay que seleccionar Worplane/ Align WP with/ Plane normal to line, para que el plano XY sea perpendicular a la línea seleccionada y el eje Z longitudinal con la línea. Antes de esto hay que introducir el ratio calculado anteriormente. Con estos pasos aparecerá en la pantalla el WP ubicado en la posición definida. Una vez ubicado el WP se sigue la ruta Preprocessor/ Modeling/ Operate/ Booleans/ Divide/ Line by WP para dividir la línea por el WP y en la unión de las dos nuevas barras el programa crea un KP como muestra la ilustración 46. Al dividir la línea el programa crea dos líneas con nombre diferente. Por último, a través de Preprocessor/ Modeling/ Create/ Lines/ Lines/ Straight line se unen los KP nuevos y los KP que se utilizaron para unir los tirantes traseros y el arco principal. Cuando se han realizado todos estos pasos ya se ha creado el diseño de la estructura básica más la primera opción de barras auxiliares, como se puede ver en la ilustración 47.



### Ilustración 46 - Resultado al dividir la primera línea

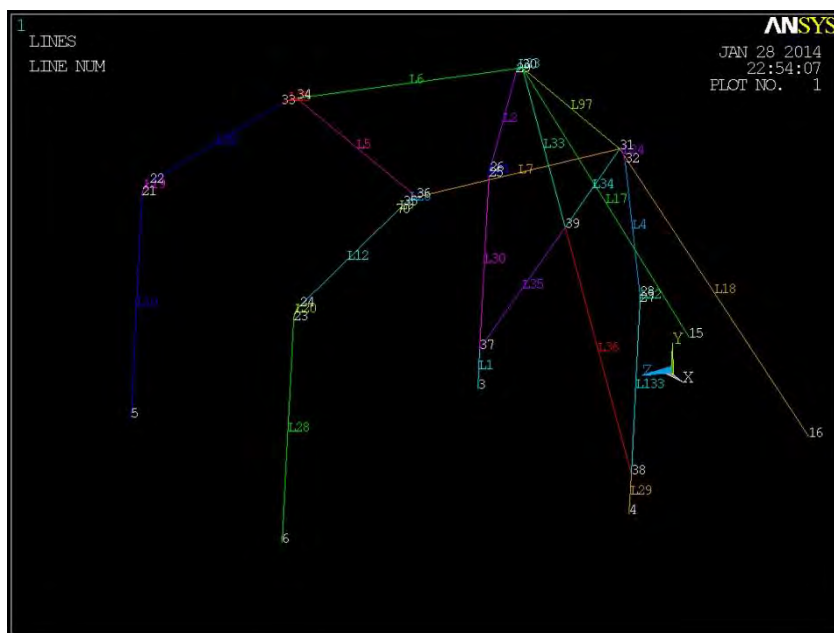


Ilustración 47 - Estructura parcial 1

A partir de aquí esta secuencia de pasos se utilizará para diseñar el resto de barras obligatorias, que en resumen es:

- Calcular el tanto por cien de línea original para ubicar el WP.
- Hacer visible el WP.
- Alinear el WP con la línea que se quiere dividir dejando el plano XY perpendicular a la línea.
- Introducir el ratio calculado en cada caso.
- Dividir la línea en dos por medio del WP.
- Crear líneas uniendo KPs.

Para introducir las dos barras de la parte delantera que unen las torretas de los amortiguadores con la estructura principal se crea, por coordenadas, un KP a cada lado del vehículo que serán las uniones de las dos barras. Para crearlos se sigue la ruta Preprocessor/Modeling/ Create/ KP/ In active CS y se introducen las coordenadas, ilustración 48. A continuación, se siguen los pasos descritos anteriormente pero con una modificación, en vez de introducir el WP por un ratio se va a introducir por coordenadas un KP contenido en cada línea vertical de los semiarcos y se coloca el WP en el KP que se ha creado en la línea a través de la ruta Workplane/ Align WP with/ Keypoints. Por lo tanto, al dividir la línea en este caso también se selecciona la opción dividir una línea por WP. El resultado que se obtiene se muestra en la ilustración 49.



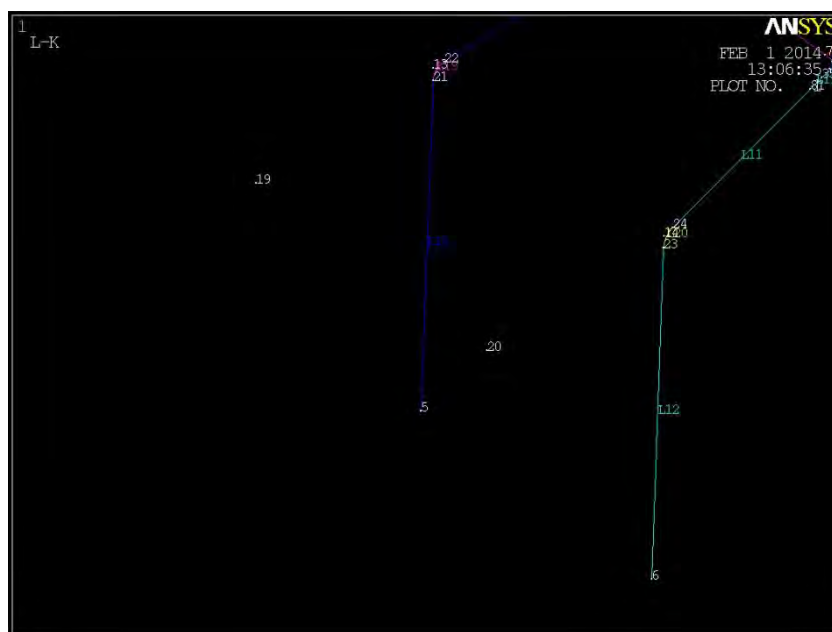


Ilustración 48 - Keypoints para tirantes delanteros

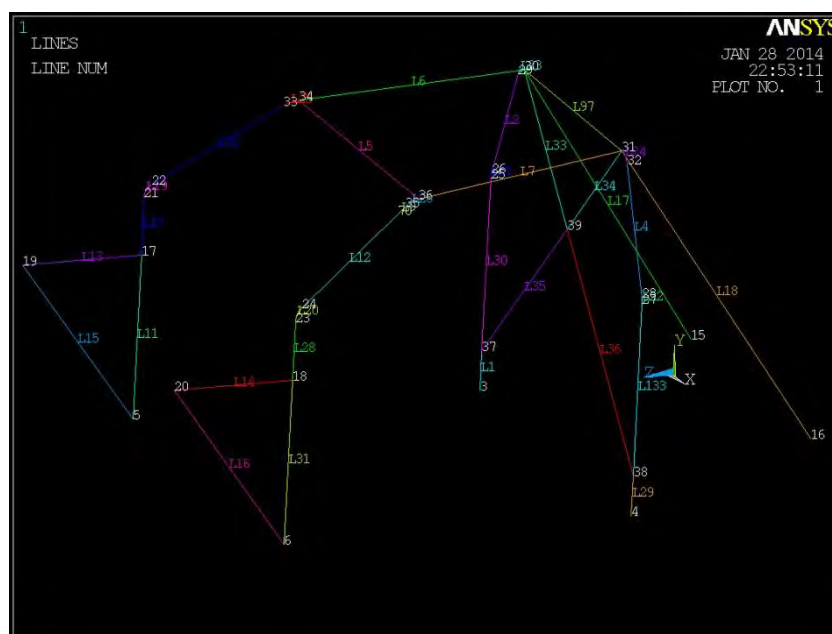
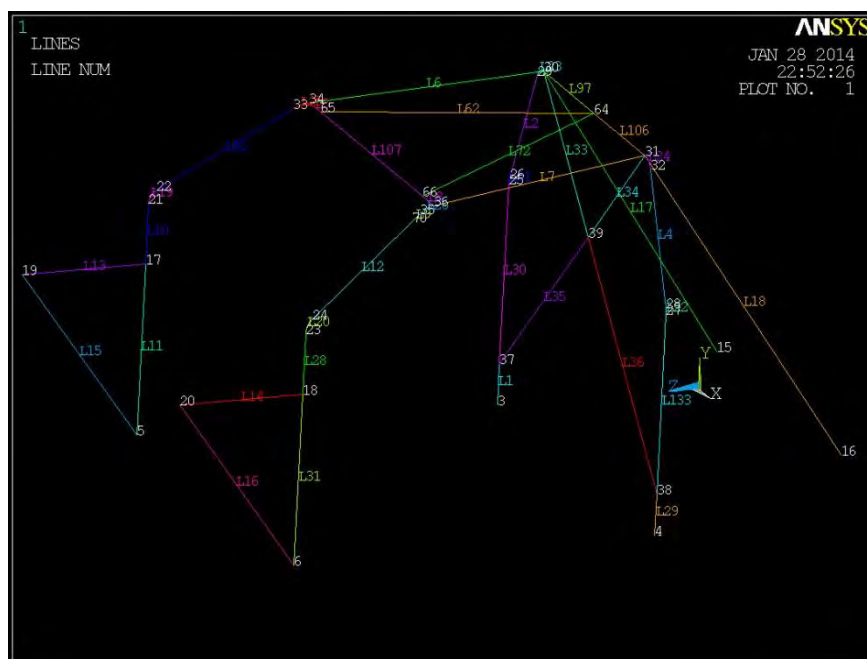


Ilustración 49 - Estructura parcial 2

Echando un vistazo atrás se puede observar que la estructura que se tiene hasta este momento posee todo lo necesario para montarse en un vehículo. Incluso hace unos años los coches competían con estructuras muy parecidas a esta puesto que las barras opcionales empezaron a ser obligatorias a partir de 2005. Aun así, en estos años la FIA obliga a completar la estructura con más componentes, por lo tanto se va a continuar explicando el diseño de dichas barras.

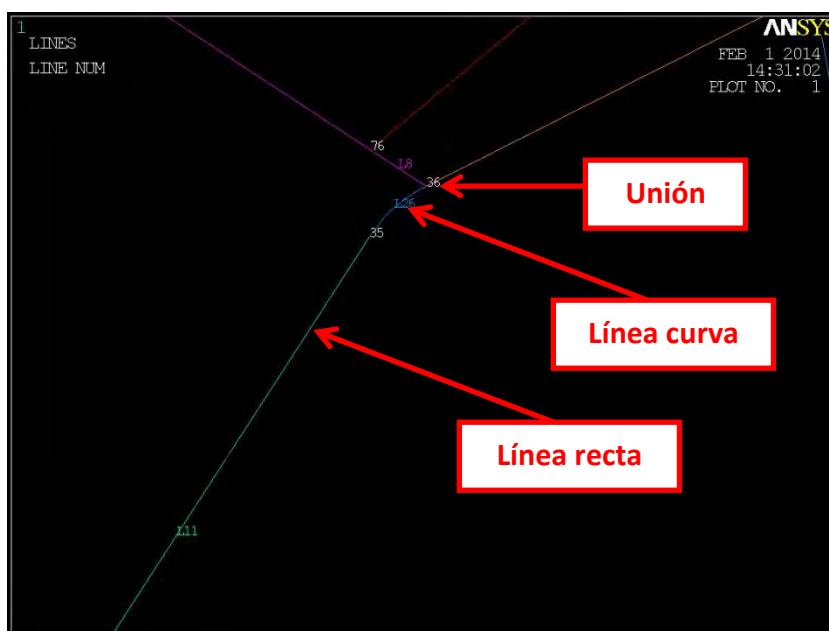


La siguiente operación a realizar es introducir los elementos de refuerzo del techo, muy importantes porque ayudan muy positivamente a la estructura en cualquiera de los dos ensayos a realizar. En este caso se van a llevar a cabo los mismo pasos que se han descrito con los tirantes diagonales. La barras afectadas que se van a dividir son el miembro transversal y la parte horizontal del arco principal. En primer lugar se empieza ubicando el WP en la barra horizontal del arco principal con un ratio de 0,5 puesto se quiere dividir dicha barra por la mitad y se divide la línea por ese WP. Posteriormente se realiza lo mismo con el miembro transversal pero cambiando el ratio. En este último caso como se quiere dividir la línea en tres partes se van a seguir los pasos dos veces dejando en los dos extremos de la barra 100 milímetros de longitud. Con la primera operación se introduce un ratio de 0,1 y para el lado contrario 0,9 que equivale hacer la operación 1-0,1. Para finalizar solo falta dividir el miembro transversal por el WP dos veces, porque se lleva a cabo en dos operaciones al haber dos ratios, y unir el KP del arco principal con los dos KPs del miembro transversal, ilustración 50.



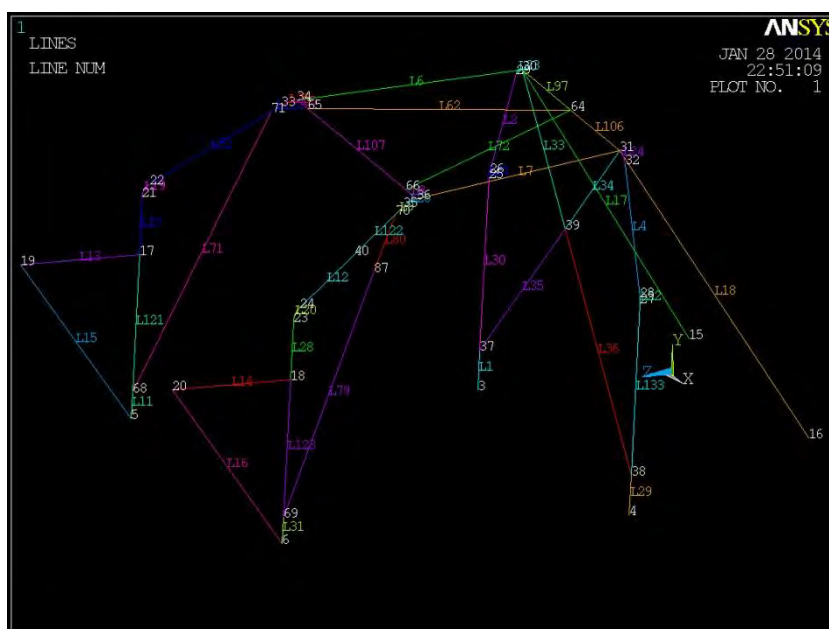
**Ilustración 50 - Estructura con refuerzos del techo**

Después de incluir los refuerzos del techo se incluyen los pilares para reforzar el parabrisas en ambos lados del vehículo. Para ello se siguen los mismo pasos, pero introduciendo los ratios correspondientes en cada operación. Para saber que ratio se debe incluir en la parte superior del pilar se hace una aproximación porque el semiarco lateral tiene líneas rectas y curvas. La aproximación consiste en medir la distancia entre los dos KP (35 y 36) de la línea curva y después restar a 100 milímetros dicha distancia, por lo que este resultado será la porción de línea recta que se debe calcular para introducir el ratio al posicionar el WP, ilustración 51.



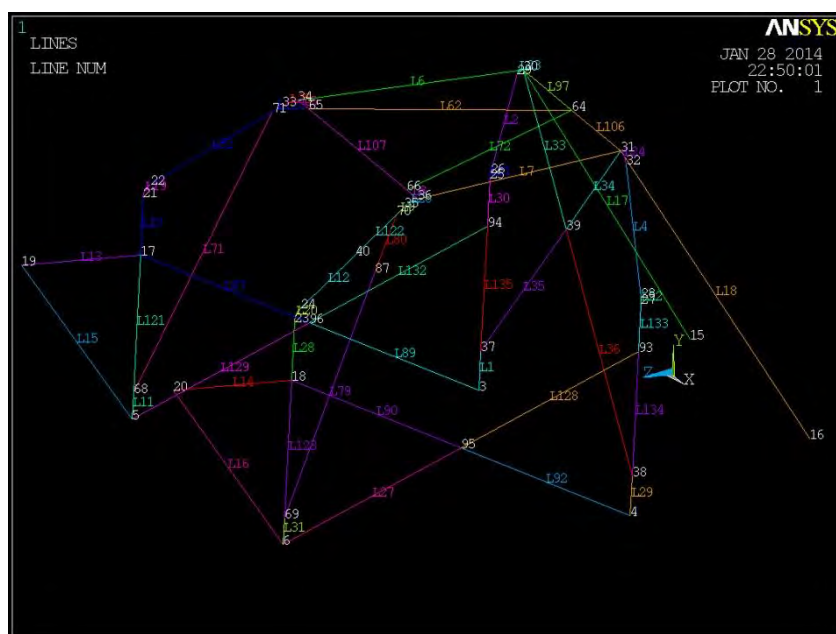
**Ilustración 51 - Aclaración de cálculo para refuerzos del parabrisas**

Una vez que se ha cortado la línea recta por el WP es conveniente comprobar que la distancia de dicho KP a la unión no es superior a 100 milímetros. A continuación se tienen que seguir los pasos generales, sin hacer la aproximación, para dividir la barra vertical del semiarco lateral alineando el WP con ratio de 0,16. Se corta esta barra y se unen el KP de la parte superior del pilar con el KP de la parte inferior. La estructura parcial se muestra en la ilustración 52.



**Ilustración 52 - Estructura con pilares de refuerzo del parabrisas**

Por último, sólo queda definir los tirantes de puertas para terminar el modelo de la estructura de seguridad. Para ello en primer lugar se introducen dos KP por coordenadas en las barras verticales del arco principal y se dividen las líneas por el WP. Estos KP tienen la misma altura que los creados al definir las barras delanteras opcionales. Posteriormente se une a través de una línea el anclaje del semiarco delantero con el último KP creado y a través de otra línea el anclaje del arco principal con el KP creado al definir las barras delanteras. Al otro lado del vehículo se crean otros dos tirantes iguales. Para finalizar como estas dos líneas se cruzan se deben dividir por el punto de unión de ambas. Para ello se selecciona Preprocessor/ Modeling/ Operate/ Booleans/ Divide/ Line by Line, como resultado se obtienen las cuatro líneas cortadas por un punto. La estructura final se puede observar en la estructura 53.



**Ilustración 53 - Estructura con tirantes de puertas**

Con todas estas indicaciones el modelo de la estructura del arco de seguridad queda definido. En el capítulo posterior se definirán los análisis que se deben aplicar a la estructura para poder obtener los resultados al realizar los dos tipos de ensayos necesarios para su homologación.

### 7.1.2 ANÁLISIS ENSAYO 1 (CARGA PUNTUAL)

Para que el modelo de una estructura arroje resultados tensionales y de deformación se deben especificar sus características, a parte de la disposición de las barras ya descritas en el capítulo anterior, como son:

- Definir el tipo de elemento que se va a estudiar en los análisis. Como se describió anteriormente hay tres grandes tipo de elementos: beam, Shell y Solid; y dentro de cada grupo se hayan diversas variantes de elementos.
- Características geométricas de los elementos del diseño puesto que el programa no sabe con qué tipo de sección se está trabajando.
- Otorgar a cada barra de la estructura sus características geométricas. No son todas iguales puesto que se trabaja con barras de diámetro exterior 40 mm y 45 mm.
- Definir una malla de la estructura para que el programa pueda analizar qué sucede en cada área del modelo.
- Aplicar las cargas a las que está sometida la estructura en cada una de los ensayos que se van a realizar. En este apartado se definirá tanto el valor y dirección de la carga como la zona en la que se aplica en la estructura.

Para homologar el arco de seguridad se deben hacer dos tipos de ensayos como especifica el anexo B con referencia [14]. En cada ensayo se utiliza una distribución de cargas diferente y se posicionan las cargas en zonas diferentes de la estructura, por estos motivos se deben realizar dos tipos de ensayos diferentes. Pero para cada ensayo se utiliza el mismo modelo, es decir, el modelo que se ha descrito en el apartado “7.1.1. Modelización”.

En este capítulo se va a definir cómo se ha efectuado el ensayo 1, es decir, con carga puntual. Inicialmente se tiene que definir en el programa con qué tipo de elemento se va a trabajar. Como se ha comentado antes, en este apartado se va a ocupar de elementos tipo Beam. Para definir este tipo de elemento se crea un “type 1” en la ruta Preprocessor/ Element type/ Add\_Edit\_Delete como se muestra en la ilustración 54.

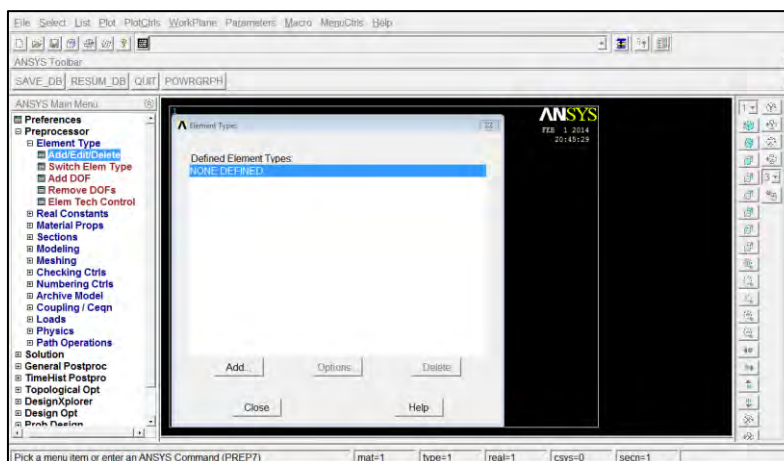


Ilustración 54 - Ventana Element Type

Se presiona la opción “Add” para añadir el tipo de elemento y aparece la ventana mostrada en la ilustración 55 donde se tiene que elegir la opción Beam/3D elastic 4. Este procedimiento se repite dos veces eligiendo la misma opción, puesto que hay dos tipos de barras con características geométricas diferentes.

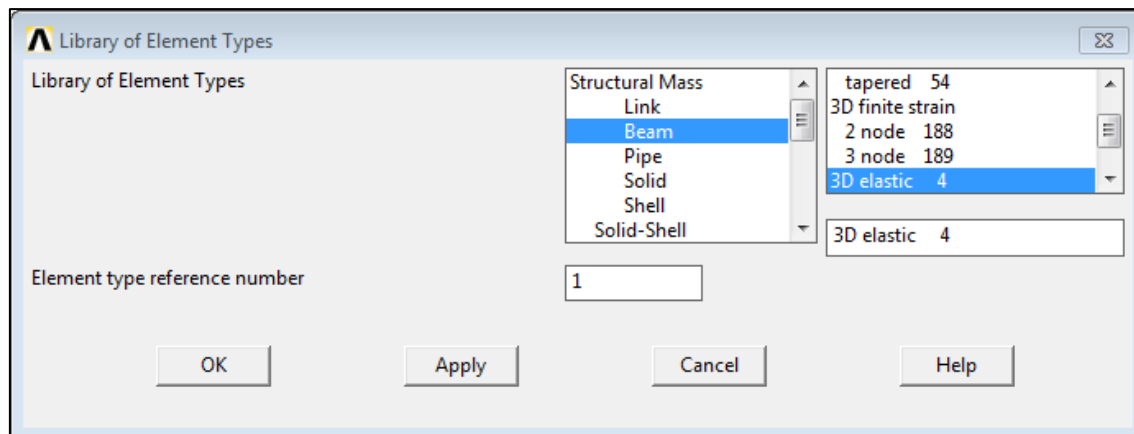


Ilustración 55 - Librería de tipos de elementos

Se elige esta opción porque el diseño se ha dibujado en las tres direcciones del espacio al igual que las cargas pueden estar en las tres direcciones y para los resultados queremos soluciones de desplazamiento en 3D. Una vez definido el tipo de elemento debe aparecer en pantalla una ventana, como la ilustración 56, donde especifique que se ha creado un “type 1” y un “type 2” vinculados al tipo de elemento “Beam4”.

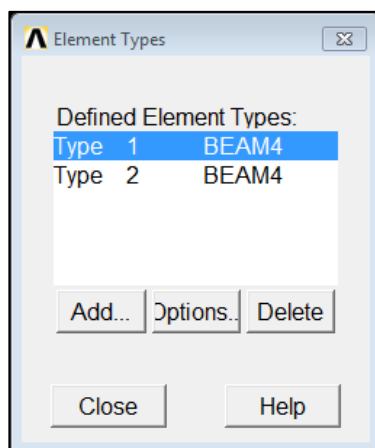


Ilustración 56 - Elección de Element Types

Una vez introducido con qué tipo de elementos se va a trabajar se tiene que definir las características de los elementos, es decir los datos de los dos tipos de sección que tiene la estructura. Para ello se sigue la dirección Preprocessor/ Real Constants/ Add\_Edit\_Delete, se presiona la opción Add en la ventana que aparece en la ilustración 57 y posteriormente se selecciona el tipo de elemento que se ha creado, es decir, Beam4. Realizados estos pasos aparece una ventana donde se deben

introducir todos los datos de cada barra. Se realizan estos pasos en dos ocasiones porque se tienen dos clases de componentes, unos con radio exterior 20 milímetros y otros con radio exterior 22,5 milímetros.

AREA: área de la sección.

IZZ: momento de inercia en el eje Z.

IYY: momento de inercia en el eje Y

TKZ: diámetro exterior.

TKY: diámetro exterior.

IXX: momento de inercia torsional.

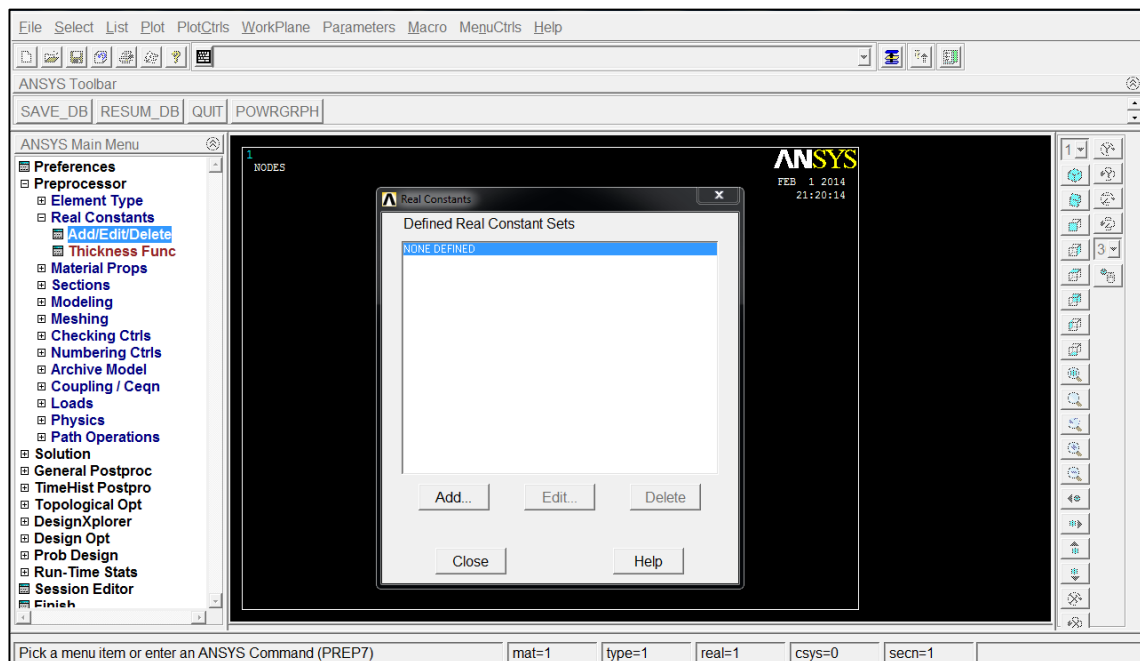


Ilustración 57 - Ventana Real Constants

A continuación se van a calcular los datos que se tienen que introducir en este modelo. La primera sección tiene unas dimensiones de radio exterior 20 milímetros y espesor 4mm, por lo tanto, el radio interior resulta 0,016 milímetros.

- Área

$$\text{Área} = \pi * (R_{\text{ext}})^2 - \pi * (R_{\text{int}})^2$$

$$\text{Área} = \pi * (R_{\text{ext}}^2 - R_{\text{int}}^2)$$

$$\text{Área} = \pi * (0,02^2 - 0,016^2)$$

$$\text{Área} = 4,524 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

- Momento de inercia

$$I_z = I_y = \frac{\pi * R_{\text{ext}}^4}{4} - \frac{\pi * R_{\text{int}}^4}{4}$$

$$I_z = I_y = \frac{\pi}{4} * (R_{\text{ext}}^4 - R_{\text{int}}^4)$$

$$I_z = I_y = \frac{\pi}{4} * (0,02^4 - 0,016^4)$$

$$I_y = I_z = 7,42 * 10^{-8} \text{ m}^4$$

- Momento de inercia torsional

$$I_0 = I_z = \frac{\pi}{2} * (R_{\text{ext}}^4 - R_{\text{int}}^4)$$

$$I_0 = I_z = \frac{\pi}{2} * (0,02^4 - 0,016^4)$$

$$I_0 = I_z = 1,848 * 10^{-7} \text{ m}^4$$

Con todos los datos calculados se introducen en el programa quedando la ventana de propiedades como muestra la ilustración 58. En el diámetro exterior se introduce el valor de 0,04 metros.

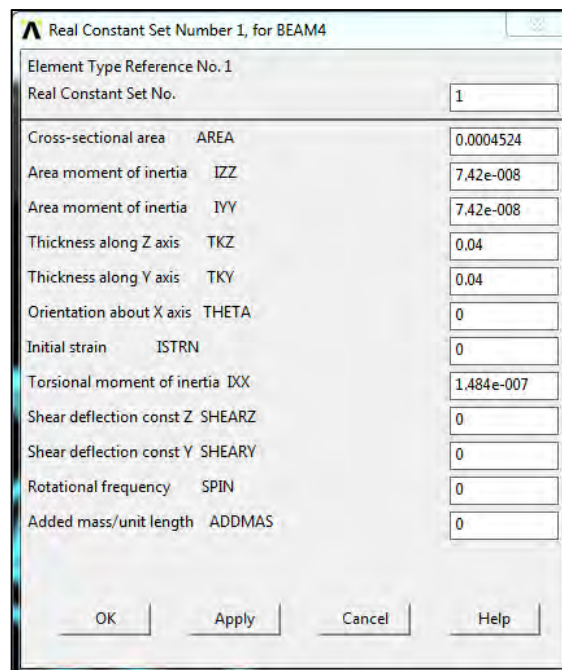


Ilustración 58 - Datos del Set 1



La segunda sección posee radio exterior 22,5 milímetros espesor 4 milímetros, por lo tanto el radio interior es 18,5 milímetros.

- Área

$$\text{Área} = \pi * (R_{\text{ext}})^2 - \pi * (R_{\text{int}})^2$$

$$\text{Área} = \pi * (R_{\text{ext}}^2 - R_{\text{int}}^2)$$

$$\text{Área} = \pi * (0,0225^2 - 0,0185^2)$$

$$\text{Área} = 5,152 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

- Momento de inercia

$$I_z = I_y = \frac{\pi * R_{\text{ext}}^4}{4} - \frac{\pi * R_{\text{int}}^4}{4}$$

$$I_z = I_y = \frac{\pi}{4} * (R_{\text{ext}}^4 - R_{\text{int}}^4)$$

$$I_z = I_y = \frac{\pi}{4} * (0,0225^4 - 0,0185^4)$$

$$I_y = I_z = 1,093 * 10^{-7} \text{ m}^4$$

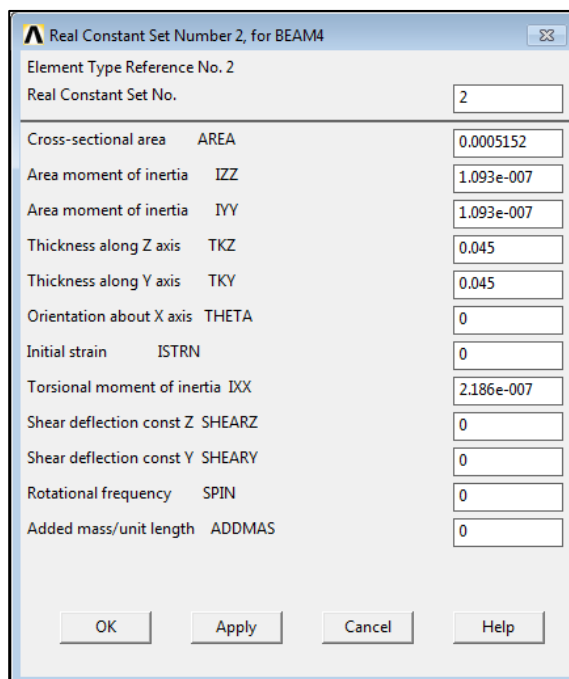
- Momento de inercia torsional

$$I_0 = I_z = \frac{\pi}{2} * (R_{\text{ext}}^4 - R_{\text{int}}^4)$$

$$I_0 = I_z = \frac{\pi}{2} * (0,0225^4 - 0,0185^4)$$

$$I_0 = I_z = 2,286 * 10^{-7} \text{ m}^4$$

Para este tipo de sección también se introduce en los apartados de “*Thickness along Z axis*” y “*Thickness along Z axis*” el valor del diámetro exterior, es decir, 0,045 metros. Todos los datos introducidos en el programa quedan reflejados en la ilustración 59.

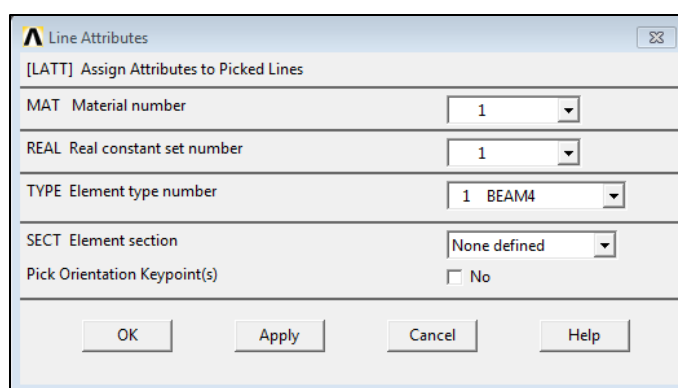


Property	Value
Element Type Reference No. 2	2
Cross-sectional area AREA	0.0005152
Area moment of inertia IZZ	1.093e-007
Area moment of inertia IYY	1.093e-007
Thickness along Z axis TKZ	0.045
Thickness along Y axis TKY	0.045
Orientation about X axis THETA	0
Initial strain ISTRN	0
Torsional moment of inertia IXX	2.186e-007
Shear deflection const Z SHEARZ	0
Shear deflection const Y SHEARY	0
Rotational frequency SPIN	0
Added mass/unit length ADDMAS	0

Ilustración 59 - Datos del Set 2

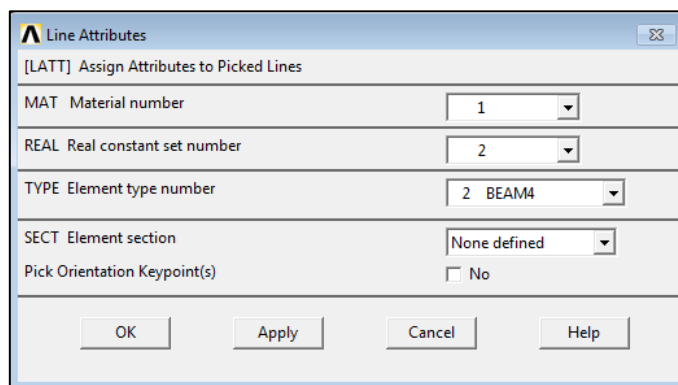
Una vez que se ha introducido los anteriores valores el programa crea un conjunto de propiedades con el nombre “Set 1” referente a las barras con radio exterior 40 milímetros y un “set 2” para las que tienen radio exterior 45 milímetros.

Después de haber creado los dos “set” se tiene que especificar cada conjunto de características geométricas a cada una de las barras de la estructura. Para ello se selecciona la herramienta Preprocessor/ Modeling/ Meshing/ Mesh attributes. Ahora para otorgar el “set 1” a la barras con radio exterior 20 milímetros se elige “Picked Lines”, se seleccionan todas las líneas menos las pertenecientes al arco principal y aparece en pantalla una ventana donde se elige material número 1, Set número 1 y elementos BEAM4, como muestra la ilustración 60. Para definir el “set 2” a las líneas con radio exterior 22,5 milímetros se escoge el material 1, Set 2, elementos BEAM 4 y se seleccionan los componentes que forman el arco principal, ilustración 61.



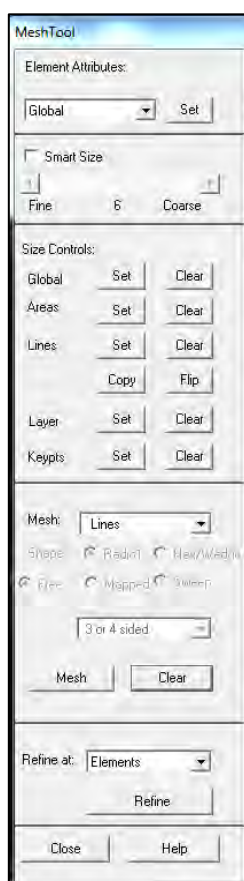
Attribute	Value
MAT Material number	1
REAL Real constant set number	1
TYPE Element type number	1 BEAM4
SECT Element section	None defined
Pick Orientation Keypoint(s)	<input type="checkbox"/> No

Ilustración 60 - Ventana de atributos Type 1



**Ilustración 61 - Ventana de atributos Type 2**

El siguiente paso, una vez que se tienen creados los tipos de elementos y sus características, es mallar la estructura para que el programa pueda calcular qué pasa en secciones tan pequeñas como se indique en la geometría de la malla. Para crear la malla se sigue la ruta Preprocessor/ Meshing/ Mesh tool y aparece una ventana donde se pueden elegir diferentes tipos de herramientas para definir cualquier estructura, ilustración 62.



**Ilustración 62 - Ventana de selección de mallado**

Para este modelo en el apartado Mesh se va a elegir Lines puesto que toda la estructura esta forma por líneas. Se presiona la opción Mesh y a continuación aparece una ventana de selección para elegir todas las líneas que se quieren mallar, en este caso se seleccionan todas las barras del modelo. Cuando finaliza el mallado aparecen todas las líneas de la estructura de color azul, esto quiere decir que el modelo está mallado y se ha realizado de manera correcta. Pero al actualizar se quita el color azul de las barras y aparecen líneas discontinuas en las barras de la estructura., ilustración 63.

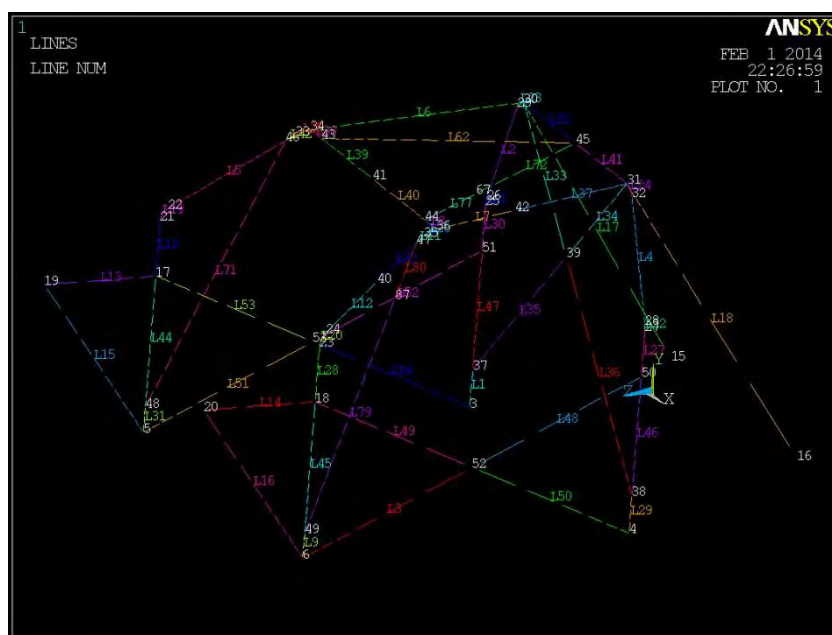
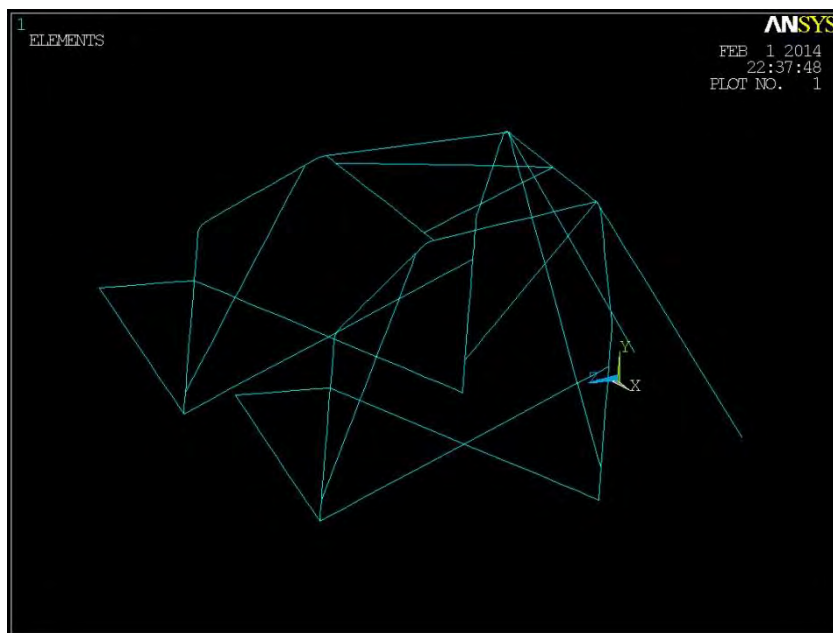
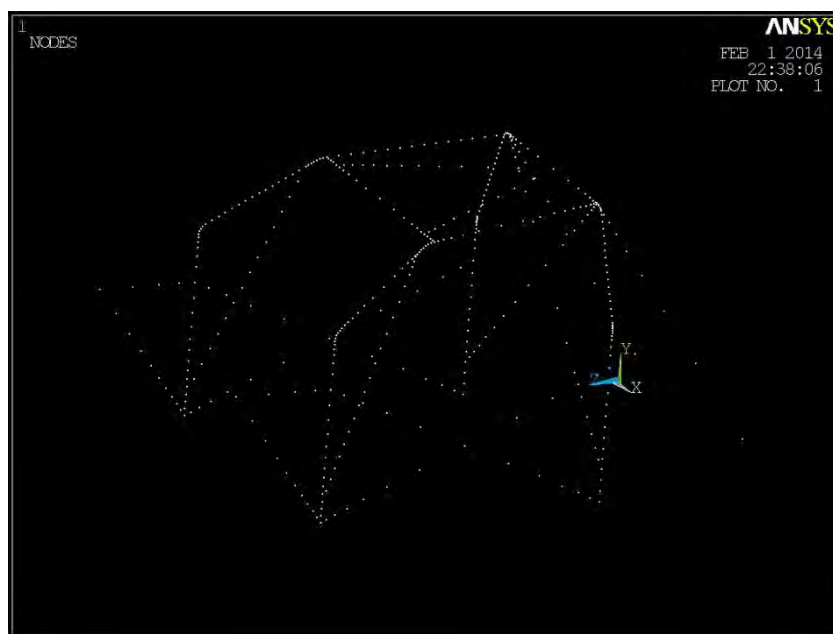


Ilustración 63 - Estructura mallada

Cada porción discontinua de línea representa los elementos que componen la malla, es decir, cada sección en que se ha dividido la barra. Para ver todos los elementos se selecciona Plot/ Elements y aparecen los elementos que componen la estructura, ilustración 64. Cada dos elementos están unidos por un punto el cual se denomina nodo, por lo que la malla está definida por elementos y nodos. Para ver los nodos se sigue la ruta Plot/ Nodes y la el programa muestra la distribución de nodos que tiene la estructura, ilustración 65.



**Ilustración 64 - Elementos que componen la estructura**



**Ilustración 65 - Nodos que componen la estructura**

Después de haber mallado la estructura llega la hora de poner restricciones al modelo para que el programa tenga definidos todos los datos necesarios para arrojar resultados tensionales y de desplazamientos. Se van a poner dos tipos de restricciones, por un lado están las restricciones de movimientos en los anclajes de la estructura y por otro lado las cargas que se aplican al modelo.

Las restricciones de movimientos se introducen en todos los anclajes de la estructura con el vehículo. Estos anclajes son: dos en las barras delanteras, dos en las

barras verticales de los semiarcos laterales, dos en las barras verticales del arco principal y dos en la parte inferior de los tirantes traseros; se pueden ver mejor en la ilustración 66.

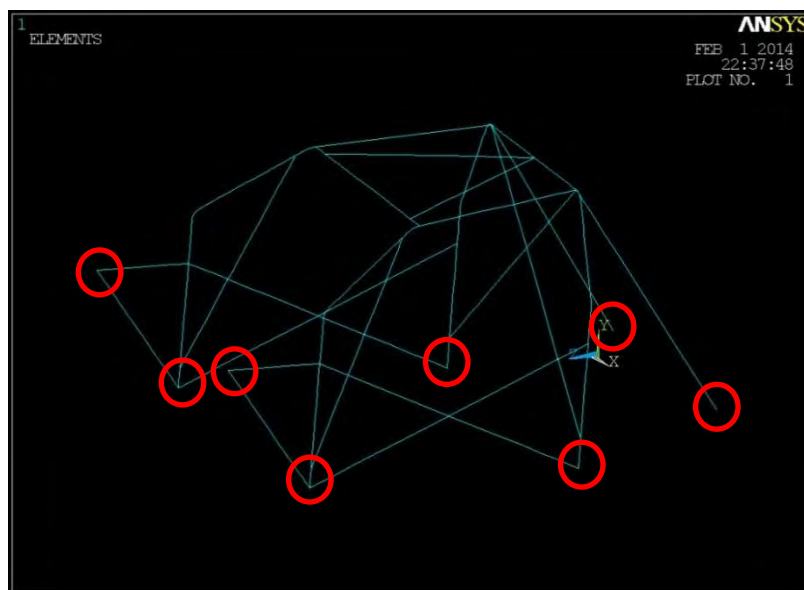


Ilustración 66 - Pies de anclaje

Para representarlos en el modelo se sigue la ruta Preprocessor/ Loads/ Define Loads/ Apply/ Structural/ Displacement/ On KP, aparece una pantalla de selección donde se eligen los 8 puntos que aparecen marcados en la ilustración 66. Una vez que se han seleccionado los puntos el programa muestra una ventana, ilustración 67, donde se eligen las restricciones que se quieren poner, para este modelo se marcarán Ux Uy Uz, puesto que esos puntos no deben tener desplazamiento en ningún eje.

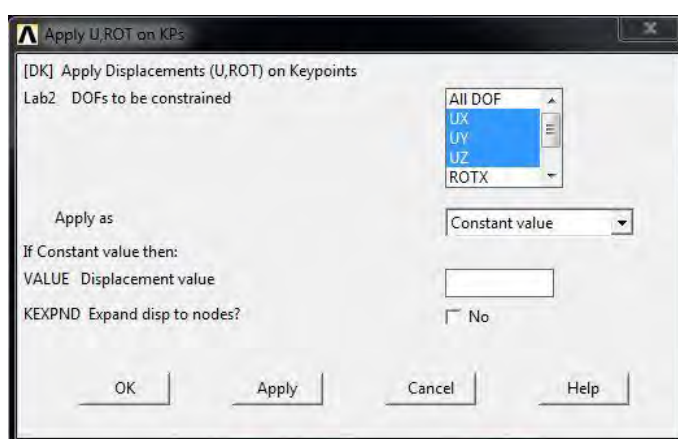
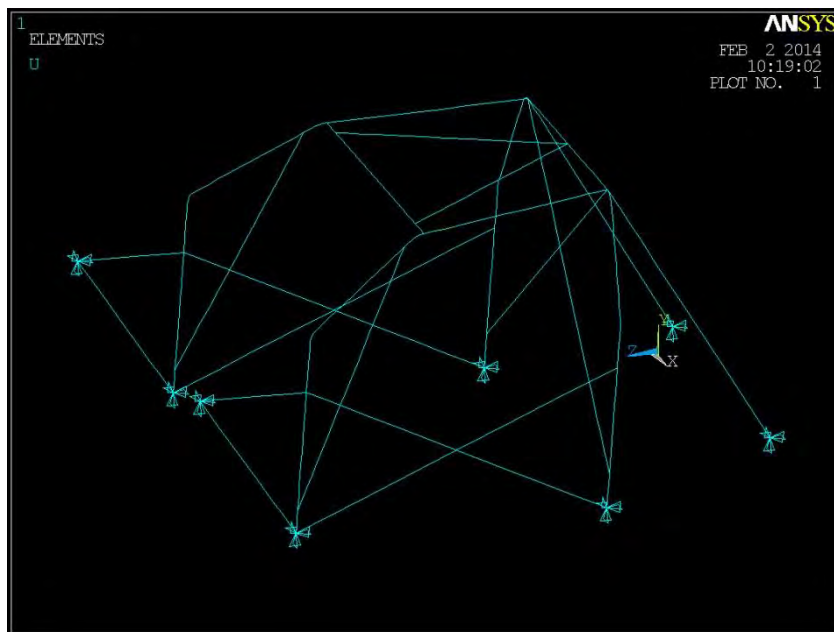


Ilustración 67 - Ventana de Displacement

Cuando se ha definido el tipo de restricciones que se imponen al modelo el programa nos arroja la estructura mallada con símbolos de restricciones de

desplazamientos en todas las direcciones de los puntos de anclaje como muestra la ilustración 68.



**Ilustración 68 - Estructura con restricciones de movimientos**

Una vez que se ha indicado en el modelo que partes de la estructura no se pueden mover, se pasa a definir las cargas que impone el anexo B (referencia 14) en el ensayo 1 de carga puntual. En el “*Ensayo 1: Carga puntual*”, del apartado “4. Tipos de ensayos”, indica textualmente “la estructura completa debe soportar una carga estática de valor  $3,5 \cdot p$  daN, donde  $p$  es el peso del coche más 150 kg; aplicada en la parte superior del arco delantero, en la intersección con el miembro transversal y en el lado del piloto. Esta carga forma  $25^\circ$  en el plano YZ y  $5^\circ$  en el plano XY”. Por lo tanto el valor de la carga es el siguiente:

$$q = 3,5 \cdot (\text{peso coche} + 150 \text{ (kg)}) \quad (\text{daN})$$

$$q = 3,5(\text{daN}) \cdot 10 \left( \frac{\text{N}}{\text{daN}} \right) \cdot (1035 + 150)$$

$$q = 41475 \text{ N}$$

A continuación se procede a calcular el valor de las tres componentes de la carga puntual, de acuerdo, a las especificaciones que otorga el anexo B con referencia [14]. Estas aclaraciones son “Esta carga forma  $25^\circ$  en el plano YZ y  $5^\circ$  en el plano XY”. Esta geometría de cargas se puede observar en la ilustración 24. Por lo tanto, descomponiendo la carga puntual en las tres direcciones del espacio resulta:

$$F_x = -F \cdot \sin 25^\circ$$



$$F_Y = -F * \cos 25^\circ * \cos 5^\circ$$

$$F_Z = -F * \cos 25^\circ * \sin 5^\circ$$

Como se ha calculado antes el valor de la fuerza es:

$$F = 41475 \text{ N}$$

Por lo que, las fuerzas en los tres ejes quedan de la siguiente forma:

$$F_X = -41475 * \sin 25^\circ = -17528,1 \text{ N/nodo}$$

$$F_Y = -41475 * \cos 25^\circ * \cos 5^\circ = -37446,1 \text{ N/nodo}$$

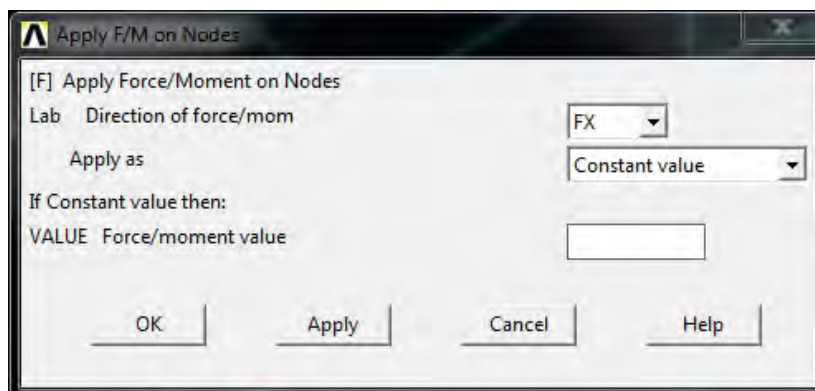
$$F_Z = -41475 * \cos 25^\circ * \sin 5^\circ = -3276,11 \text{ N/nodo}$$

Para ubicar la carga en el modelo se sigue la ruta Preprocessor/ Loads/ Define Loads/ Apply/ Structural/ Force\_Moment/ On Nodes, aparece en pantalla una ventana de selección donde se elige el nodo que se quiere utilizar. En este modelo se ubicará la carga en el nodo que ejerce de unión entre el miembro transversal y el semiarco lateral izquierdo, se puede ver en la ilustración 69. Es muy aconsejable que antes de introducir la carga se seleccione Plot/ Nodes para seleccionar exactamente el nodo idóneo, puesto que si en pantalla se tienen visualizados los elementos no se puede ver con total seguridad si el nodo es el correcto o no.



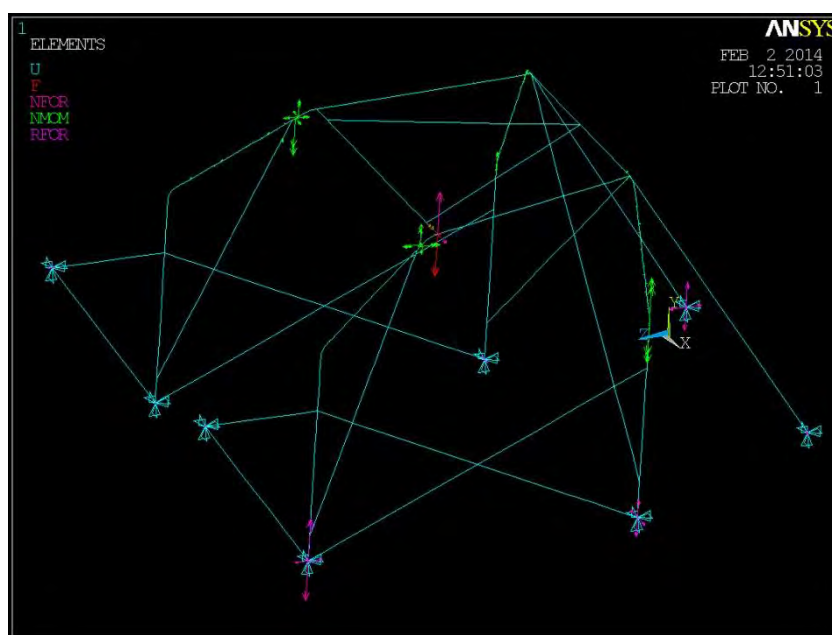
**Ilustración 69 - Zona de aplicación de la carga puntual**

Después de elegir el nodo para ubicar la fuerza el programa muestra en pantalla una ventana para dar propiedades a las cargas, ilustración 70. En el apartado "Direction of force/mom" se elige en el desplegable que dirección se va adjudicar a la carga y en el apartado "Value force" se introduce el valor de la carga, en caso de ser una fuerza negativa se debe poner delante del valor un signo menos "-". En nuestro caso al ser una carga puntal tridimensional se introducen tres cargas ( $F_x$   $F_y$   $F_z$ ) y cada fuerza con su valor correspondiente.



**Ilustración 70 - Ventana de propiedades de la carga puntual**

Por lo tanto se introduce una fuerza  $F_x$  con valor -17528,1,  $F_y$  con valor -37446,1 y  $F_z$  con valor -3276,11. En la pantalla aparece el diseño de la estructura mallada y completada con los símbolos de las restricciones y con la carga en los tres ejes como indica la ilustración 71. Esta imagen muestra tanto la carga como las reacciones que tiene la estructura respecto la fuerza aplicada.



**Ilustración 71 - Estructura con carga puntual**

Hasta aquí la estructura del arco de seguridad queda definida y ya está lista para que el programa resuelva el modelo y proporcione los resultados tensionales y de desplazamientos.

### 7.1.3 RESULTADOS ANÁLISIS 1 (CARGA PUNTUAL)

Con el diseño y el análisis concluido solo falta que el programa resuelva el modelo, para ello se sigue la ruta Solution/ Solve/ Current LS y si el programa ha resuelto correctamente el modelo aparece en pantalla un mensaje que publica "Solution is done", como se observa en la ilustración 72.

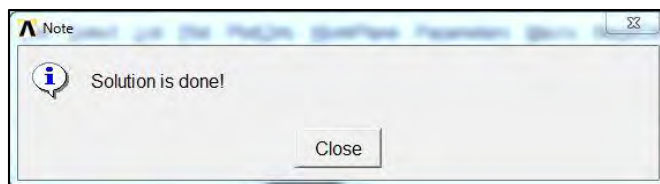


Ilustración 72 - Aviso de solución realizada

Para estudiar los resultados se deben tener claros las limitaciones que impone el anexo B con referencia [14], explicado también en el apartado "4. Tipos de ensayos". Por un lado impone que la deformación máxima en cualquier punto de la estructura no debe ser mayor a 100 milímetros en dirección en la que se aplica la fuerza. Y por otro lado no se debe producir rotura en la estructura, por lo tanto, se deben comparar las tensiones máximas de Von Mises que arroja el programa con el límite elástico y el límite de rotura del material empleado.

Para ilustrar los resultados referentes a las deformaciones, en el programa, se sigue la ruta General Postprocessor/ Plot results/ Contour Plot/ Nodal solution y aparece en pantalla una ventana donde se puede seleccionar cualquier tipo de resultado que se quiere observar, ilustración 73. Como se ve en dicha imagen se puede elegir análisis de desplazamientos, tensional, de energía, etc. En este caso se selecciona DOF Solution/ Displacement Vector Sum, este tipo de ensayo arroja todos los desplazamientos, sin distinguir en qué dirección se producen, pero este detalle se puede observar con los resultados del diseño que proporciona la interfaz gráfica. En la ilustración 74 se observan todos los resultados que arroja Ansys. El programa en esta imagen nos informa del valor del desplazamiento máximo y mínimo, en metros, en la esquina superior izquierda, en la parte inferior de la pantalla muestra una leyenda donde se observa que valor del desplazamiento corresponde con cada color y en el centro muestra el modelo de la estructura con la distribución de colores de la leyenda, además en este cuadro nos proporciona en que zonas se produce el desplazamiento máximo y mínimo.

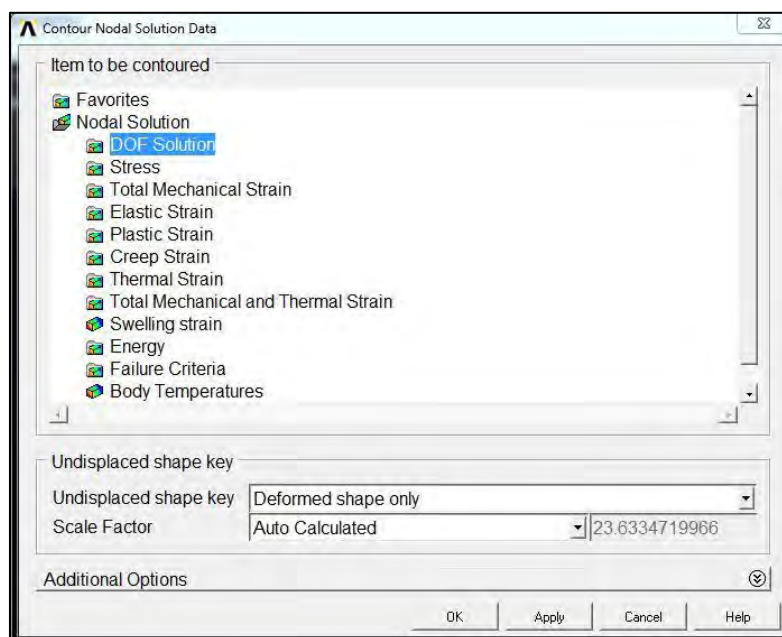


Ilustración 73 - Ventana de selección de resultados

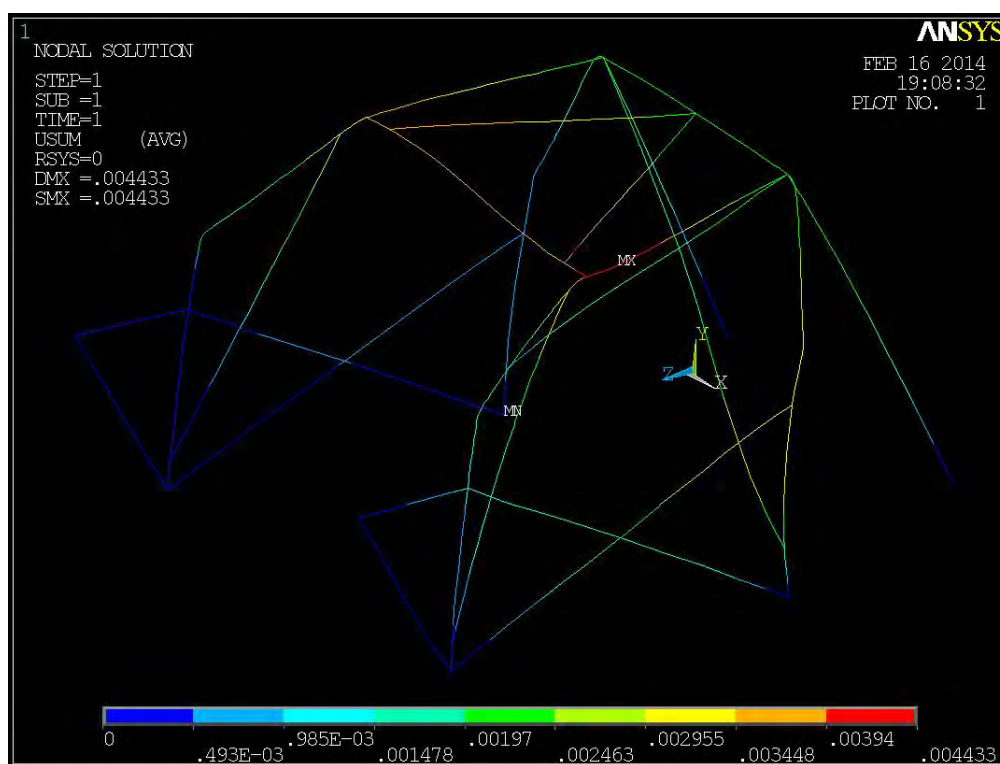
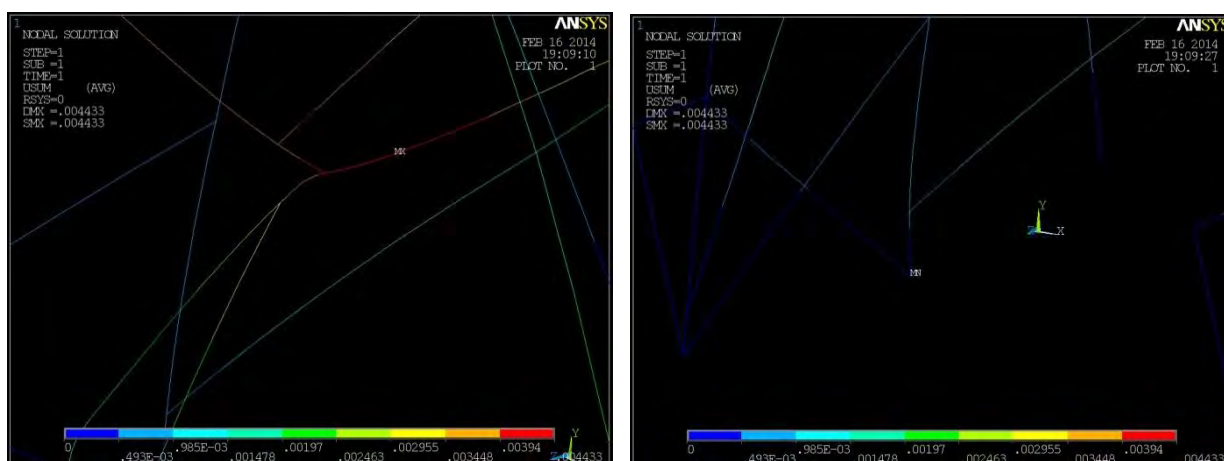


Ilustración 74 - Resultados de desplazamientos con carga puntual

Visualizando la ilustración 74 se observa como la deformada se comporta de forma normal respecto lo esperado antes de realizar el ensayo, deformándose más la estructura en la zona de aplicación de la fuerza y en las áreas más alejadas teniendo menor desplazamiento. También es correcta la distribución de colores que presentan

los resultados porque en la zona de la carga tiene color rojo, es decir el desplazamiento es mayor, y según se aleja de dicho área los colores pasan de rojo a naranja, de naranja a amarillo, de amarillo a verde y de verde a azul. Quedando el lado derecho de la estructura de color azul puesto que la carga no se aplica en esa mitad. El valor del desplazamiento máximo, según nos muestra el programa, es de 4,433 milímetros ubicado en el nodo donde se aplicó la carga y el valor mínimo del desplazamiento está en unos de los anclajes de la mitad derecha del vehículo, ilustración 75. Estos datos también se corresponden con lo esperado.



**Ilustración 75 - Desplazamiento máximo a la izquierda y mínimo a la derecha**

A simple vista el valor del desplazamiento máximo puede parecer muy bajo pero en realidad es correcto, puesto que este ensayo equivale a dar la vuelta al coche y apoyar, con mucho cuidado, todo su peso en la parte de la estructura donde se aplicó la carga. Si se produjese este hecho las barras de la estructura no tendrían deformaciones mucho mayores. En un caso de choque estas barras sí que tendrían mayores deformaciones puesto que se les estaría aplicando una energía cinética y parte de esta energía lo absorbe el arco de seguridad.

A continuación se va a realizar el análisis de resultados respecto a la distribución de tensiones. Para ello se sigue la ruta General Postprocessor/ Plot results/ Contour Plot/ Nodal solution y en la siguiente ventana se elige Stress/ Von Mises Stress. Para que se vean las tensiones en cada una de las barras se selecciona PlotCtrls/ Style/ Size and Shape y en el apartado Display of element se elige la opción "On". Es de gran ayuda para estudiar los resultados de tensiones limitar el valor máximo de tensión en la escala al valor del límite elástico del material. Porque de este modo se puede observar a simple vista qué zonas de la estructura tienen comportamiento elástico o plástico. Para incorporar esta mejora se selecciona PlotCtrls/ Style/ Contours/ Uniform Contours y aparece una ventana (ilustración 76)



donde se pone en “Min contour value” el valor de 1 Pa, en “Max contour value” el valor del límite elástico, es decir,  $695 \cdot 10^6$  Pa y elegir la opción “User specified”.

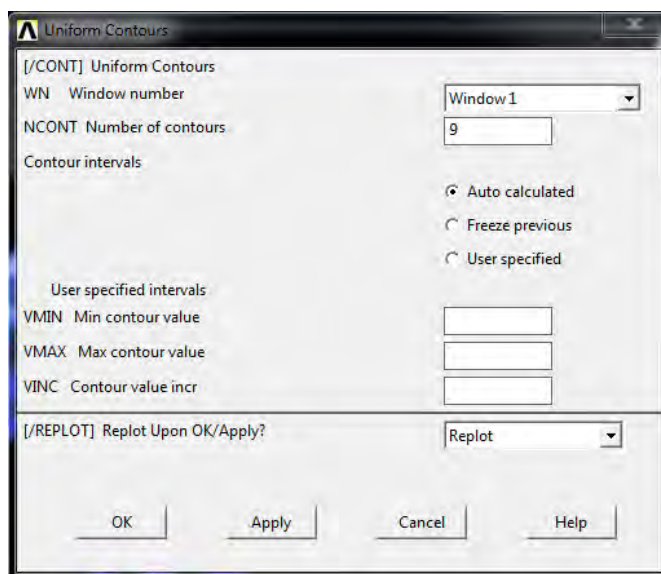


Ilustración 76 - Ventana para definir la leyenda

Una vez realizados todos estos pasos el programa arroja en pantalla los resultados tensionales del modelo como se puede observar en la ilustración 77.

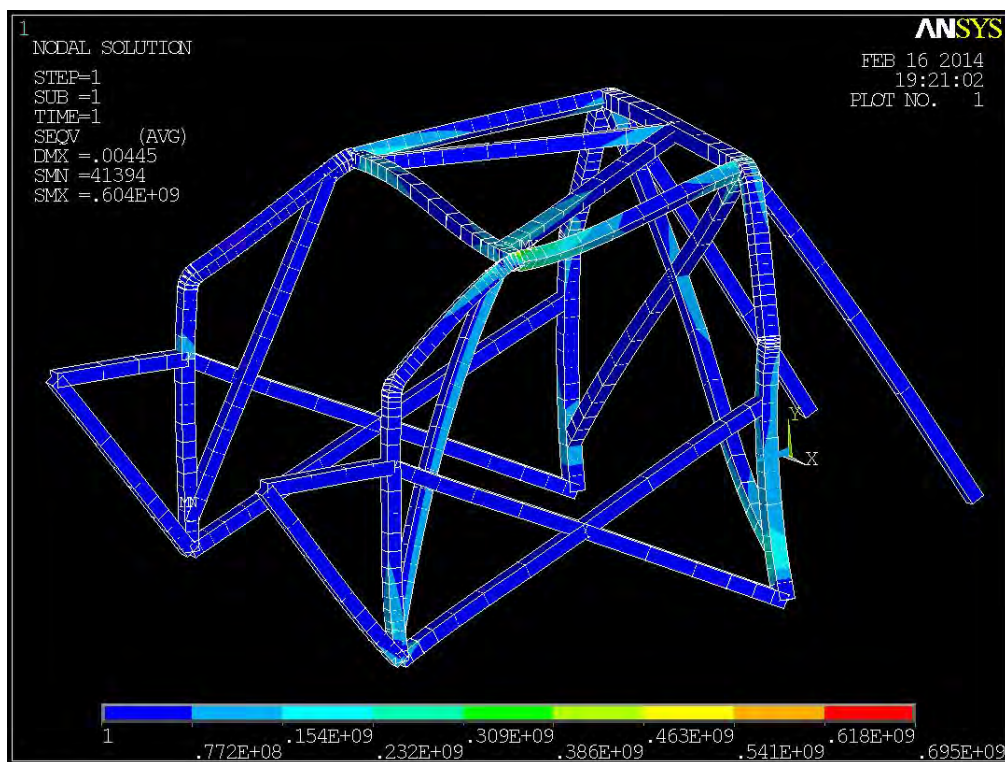


Ilustración 77 - Resultados tensionales con carga puntual

En la imagen de resultados tensionales se puede ver como la distribución de tensiones es homogénea, situándose las mayores tensiones en el área de aplicación de la carga y en las uniones de barras que representan zonas de soldadura. El valor de tensión máxima es 604·106 Pa y como era de esperar se sitúa en la zona de aplicación de la fuerza y el valor mínimo está en uno de los pies de anclaje, ilustración 78. El valor de la tensión máxima no supera el límite elástico del material, por lo tanto, la estructura se deforma de manera elástica. Este dato es acorde con la deformación máxima, puesto que 4 milímetros en una estructura de esta envergadura es casi despreciable.

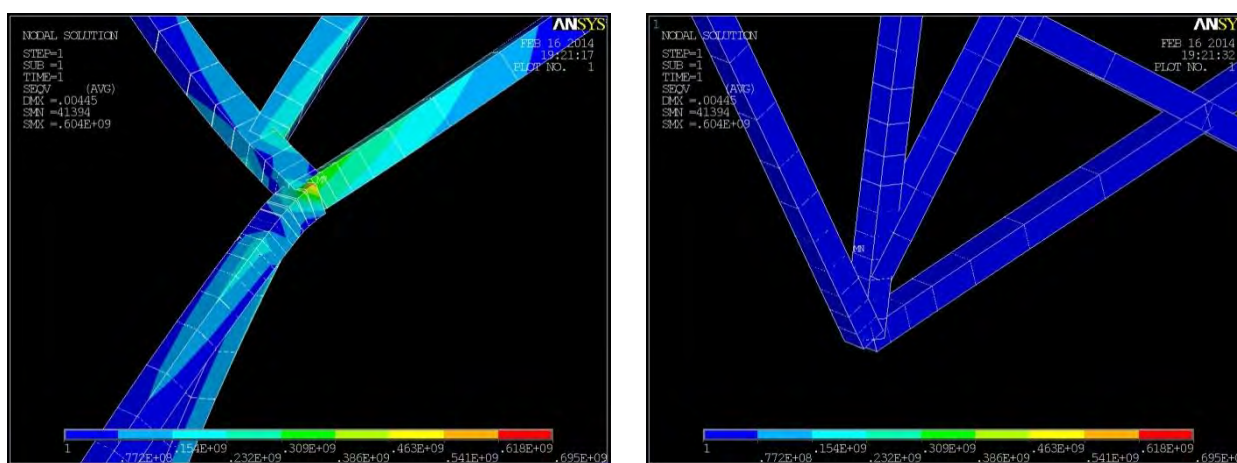


Ilustración 78 - Tensión máxima a la derecha y mínima a la izquierda

La tensión máxima aparte de estar localizada en la zona de aplicación de la carga está también en una unión. Se sabe de antemano que los modelos ensayados con elementos tipo Beam no arrojan resultados muy exactos en dichas zonas de unión, por lo que, más adelante se estudiará con un modelo de elementos tipo Shell cómo se comportan estas zonas complicadas. Aparte también servirá para comparar resultados de elementos tipo Beam con elementos tipo Shell que a priori deberían salir bastante parecidos.

#### 7.1.4 ANÁLISIS ENSAYO 2 (CARGA DISTRIBUIDA)

Para este capítulo se utiliza el mismo diseño de estructura que para el apartado “7.1.2 Análisis ensayo 1 (carga puntual)”, puesto que lo único que cambia para este modelo es el valor y la ubicación de la carga. Por lo tanto, se abre el archivo que se guardó con el modelo de la estructura completa. Se define el tipo de elemento con el que se va a trabajar, que también es elementos tipo Beam 3D plastic 4, y quedan creados el “Type 1” y el “Type 2”. A continuación, se definen los “Set 1” y “Set 2” de constantes reales de los elementos Beam4, que coinciden con los mismos datos de



área, momentos de inercia y radio exterior que el análisis de carga puntual descrito en el apartado 7.1.2. Después se vincula cada “Set” a sus correspondientes barras del modelo. Posteriormente se crea la malla del modelo de la misma forma que se hizo con el modelo anterior. Y se crean las restricciones de movimiento en el modelo en los 8 pies de anclaje del diseño, limitando a cero los desplazamientos  $U_x$   $U_y$  y  $U_z$ . Hasta aquí se llevan a cabo los mismos pasos que se describieron en el análisis de modelo 7.1.2 con carga puntual.

Pero ahora la carga que se aplica al modelo es diferente. En el apartado anterior se trataba de una carga puntual en tres direcciones y ahora es una carga distribuida en dirección Y. También cambia la zona de aplicación de la carga, en este modelo la carga se aplica en la barra horizontal del arco principal. Y el valor de esta fuerza es diferente al anterior. Todas estas características del nuevo ensayo se explican en el apartado “Ensayo 2: carga vertical sobre arco principal” dentro del capítulo “4. Tipos de ensayos”. Ese punto, saca del anexo B con referencia [14], explica textualmente lo siguiente: “La estructura completa debe resistir una carga estática vertical de valor  $7,5 \cdot p$  daN, donde  $p$  es el peso del coche más 150 kg, aplicada en la parte superior del arco principal”. A continuación se calcula el valor de la carga distribuida con dichas indicaciones:

$$q = 7,5 * (\text{peso coche} + 150 \text{ (kg)}) \quad (\text{daN})$$

$$q = 7,5(\text{daN}) * 10 \left( \frac{\text{N}}{\text{daN}} \right) * (1035 + 150)$$

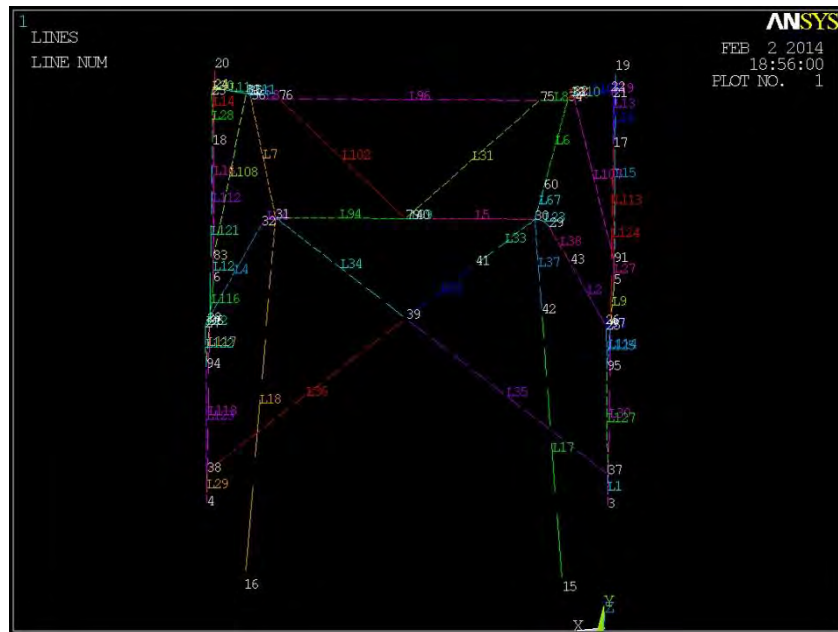
$$q = 88875 \text{ N}$$

Como las cargas siempre se tienen que ubicar en nodos, el primer paso que se debe hacer es dejar los nodos referentes a la línea de aplicación de la carga en la pantalla del programa. Por lo tanto, se selecciona Select/ Entities y aparece en la pantalla una ventana, en la cual se puede seleccionar cualquier tipo de elemento del modelo, ilustración 79.



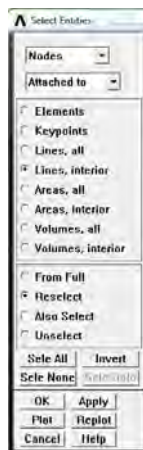
Ilustración 79 - Herramienta de selección

En esta ventana se elige la opción “Lines” porque se quiere seleccionar líneas, y la opción “From Full” porque se van a elegir líneas de todo el modelo. Después de pulsar Ok, surge en la pantalla la ventana de selección donde se va a seleccionar, de todo el modelo, las líneas 94 y 5 correspondientes a la barra horizontal del arco principal, como se muestra en la ilustración 80. Dicha barra aparece ilustrada por dos líneas en el modelo, esto se debe a que al incluir las barras que protegen el techo se tuvo que cortar dicha línea con la unión de los dos refuerzos, pero este hecho no altera los resultados del modelo.



**Ilustración 80 - Zona posterior de la estructura principal**

Una vez que se han elegido las dos barras, ahora se tienen que seleccionar los nodos referentes a dichas líneas. Para ello se pulsa otra vez en Select/ Entities y vuelve aparecer la ventana de la ilustración 79. Pero en este caso se escogen las opciones siguientes: nodes, attached to, lines interior, reselect; como se muestra en la ilustración 81.



**Ilustración 81 - Opciones para seleccionar nodos**

Con estas opciones establecidas en la ventana de selección se debe pulsar Plot/Nodes para que aparezcan en pantalla los nodos referentes a dichas líneas elegidas. Estos nodos aparecen en la ilustración 82.

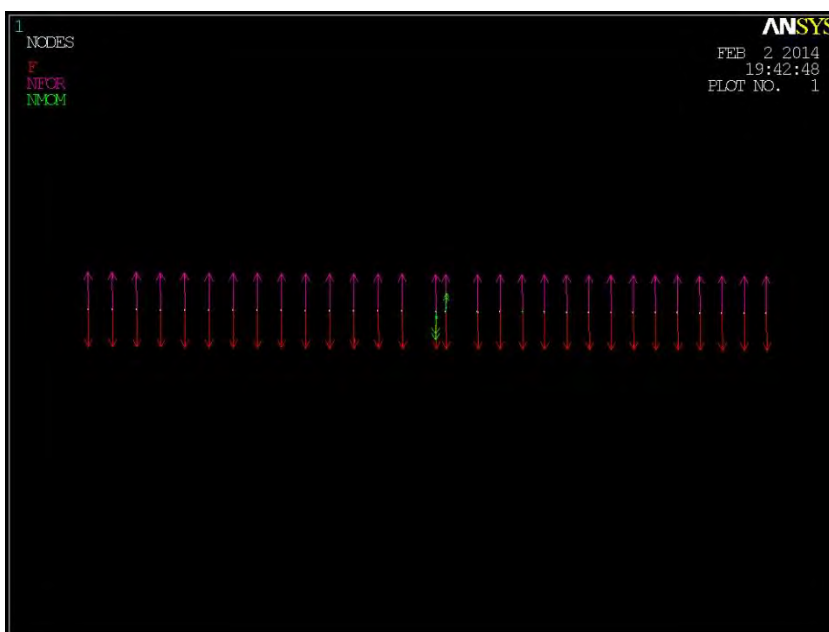


**Ilustración 82 - Nodos donde ubicar la carga distribuida**

Como la barra tiene un número determinado de nodos, se debe repartir el valor de la carga en cada uno de los nodos. Por lo tanto, hay que contar el número de nodos que dispone la barra y dividir el valor de la carga entre dicho número. Para que salga en pantalla la cantidad de nodos que hay en las líneas se selecciona Select/Entities y en la ventana se elige: nodes, from full y reselect. A continuación, en la pantalla de selección se escoge la opción “box” y ahora se hace con el ratón un cuadrado a todo el diseño. De esta manera sólo se seleccionan nodos de las líneas que interesan. Hecho esto el número de nodos que tiene la barra es 30, por lo tanto si se divide la carga total entre 30 nodos sale la carga que soporta cada uno.

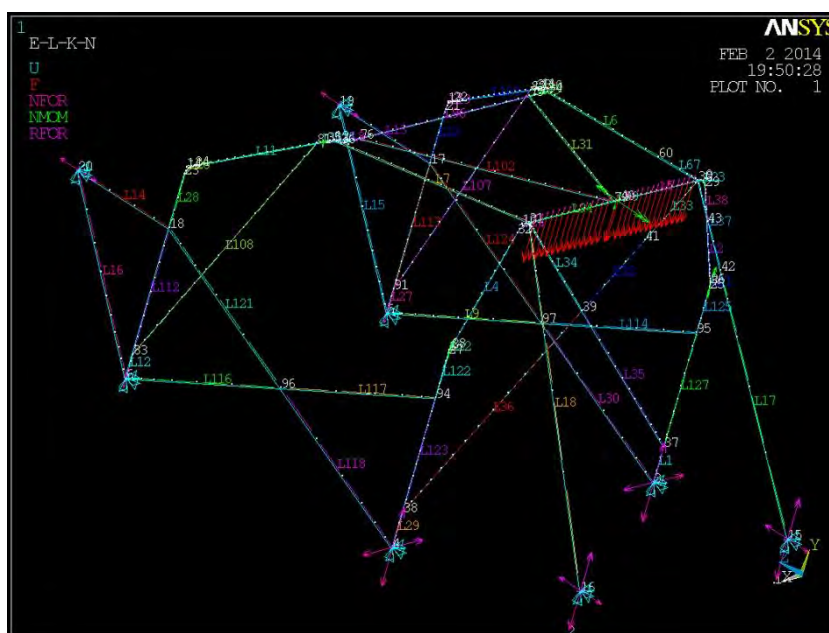
$$F_{Y \text{ por nodo}} = \frac{88875 \text{ N}}{30 \text{ nodos}} = 2962,5 \text{ N/nodo}$$

Ahora se tiene que introducir la fuerza haciendo Preprocessor/ Loads/ Define Loads/ Apply/ Structural/ Force\_Moment/ On Nodes; se seleccionan los 30 nodos y dentro de la ventana que emerge se selecciona fuerza “FY” y se introduce el valor “-2962,5 N”. Es negativo porque la carga distribuida va en dirección “-Y”. Una vez que se ha introducido la carga el programa muestra en la pantalla todos los nodos y cada uno con su respectiva cantidad de carga como muestra la ilustración 83.



**Ilustración 83 - Carga distribuida**

Es muy importante que después de aplicar la carga se marque Select/Everything para que se seleccionen todos los elementos creados. Y también se hace Plot/MultiPlot para que aparezcan todos los elementos del modelo en la pantalla, ilustración 84.



**Ilustración 84 - Estructura completa con carga distribuida**

Hasta aquí el análisis queda totalmente definido, a continuación se calculará el modelo y el programa arrojará los datos de desplazamientos y tensiones.

### 7.1.5 RESULTADOS ENSAYO 2 (CARGA DISTRIBUIDA)

En este apartado se van a explicar los resultados arrojados por el programa cuando al diseño se le aplica una carga distribuida en la barra horizontal del arco de seguridad. Para que aparezcan los resultados en pantalla se sigue la ruta General Postprocessor/ Plot results/ Contour Plot/ Nodal solution. Como se llevó a cabo en el capítulo “7.1.3 Resultados ensayo 1 (carga puntual)”, en primer lugar se realizará un estudio con los resultados referentes a desplazamientos y posteriormente relativos a tensiones.

En la ilustración 85 se puede observar como la deformada de la estructura se comporta de forma normal, sin tener desplazamientos extraños en zonas alejadas del área de aplicación de la fuerza. Como era de esperar la zona del modelo con mayores desplazamientos, en la imagen dibujadas de color rojo, se concentran en el centro de la barra horizontal del arco de seguridad y en la punta de unión de las dos barras de refuerzo del techo. El área de color rojo se concentra en el centro de dicha barra debido a que esa zona se encuentra más desprotegida de barras auxiliares que los extremos, donde apoyan a la estructura los dos miembros diagonales con forma de “X” y los tirantes traseros.

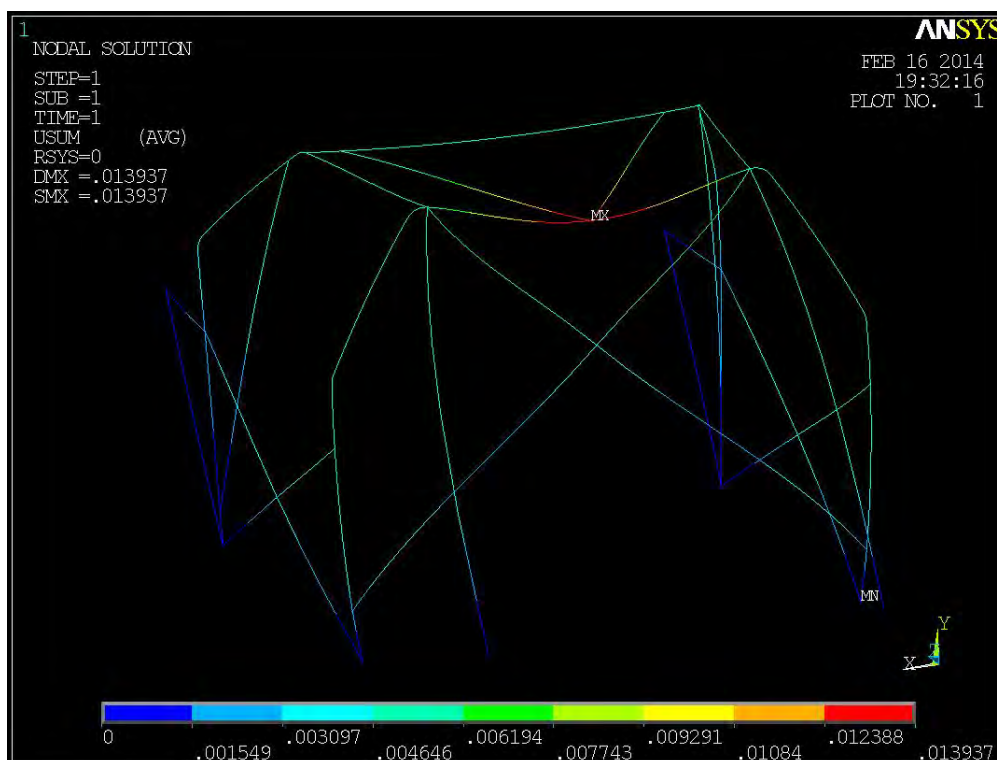
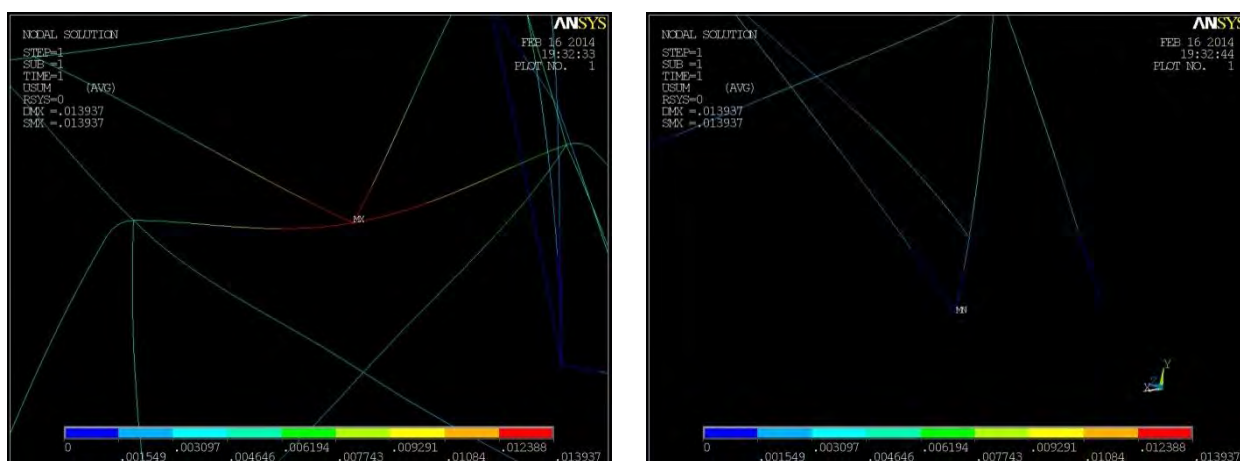


Ilustración 85 - Resultados de desplazamientos con carga distribuida

Pero en esta franja de línea se encuentra el desplazamiento máximo cuyo valor es 13,937 milímetros y el valor mínimo de desplazamiento se sitúa en el anclaje derecho del arco principal, ilustración 86. La localización de los dos desplazamientos es coherente puesto que el máximo se encuentra en pleno área de aplicación de la carga y el mínimo en un punto muy alejado de esta área, además que se impidió en el modelo sus desplazamientos al situarse en un anclaje. Como el valor del desplazamiento máximo es menor que el máximo desplazamiento impuesto por el anexo B (referencia 14) para este ensayo 2, que era 50 milímetros, el modelo se sitúa dentro de la homologación.



**Ilustración 86 - Desplazamiento máximo a la izquierda y mínimo a la derecha**

Como se comentó en el apartado “7.1.3 Resultados ensayo 1 (carga puntual)”, los valores muy pequeños de desplazamientos son debidos a que el ensayo es equiparable a dar la vuelta al coche y apoyarlo sobre la barra horizontal del arco de seguridad. Si se tratase de un choque con algún objeto estos valores aumentarían su valor.

Para lograr los resultados tensionales se realizan los mismos pasos que se explicaron con anterioridad en la parte de resultados tensionales, es decir, se selecciona que aparezca en pantalla la tensión de Von Mises y que la estructura aparezca en pantalla visualizando cada uno de sus elementos. Respecto a los resultados, como se puede ver en la ilustraciones 87, 88 y 89, se observa que la distribución de tensiones no presenta ningún cambio de tensión brusco ni se visualizan tensiones muy elevadas en zonas donde no afecta directamente la carga. Como se puede observar en la ilustración 87 en todas las uniones de la estructura hay un aumento del valor de la tensión con respecto la zona central de las barras. Pero dentro de todos estos aumentos las uniones más críticas son las que se sitúan en los extremos de la barra horizontal del arco principal cuyo valor de tensión supera el límite elástico del material, al igual que pasa en la zona central de dicha barra, ilustración 89. El valor



máximo de tensión es 1070 MPa y se sitúa en la unión derecha de la barra horizontal con el arco principal y la tensión mínima está en uno de los pies de anclaje, ilustración 90.

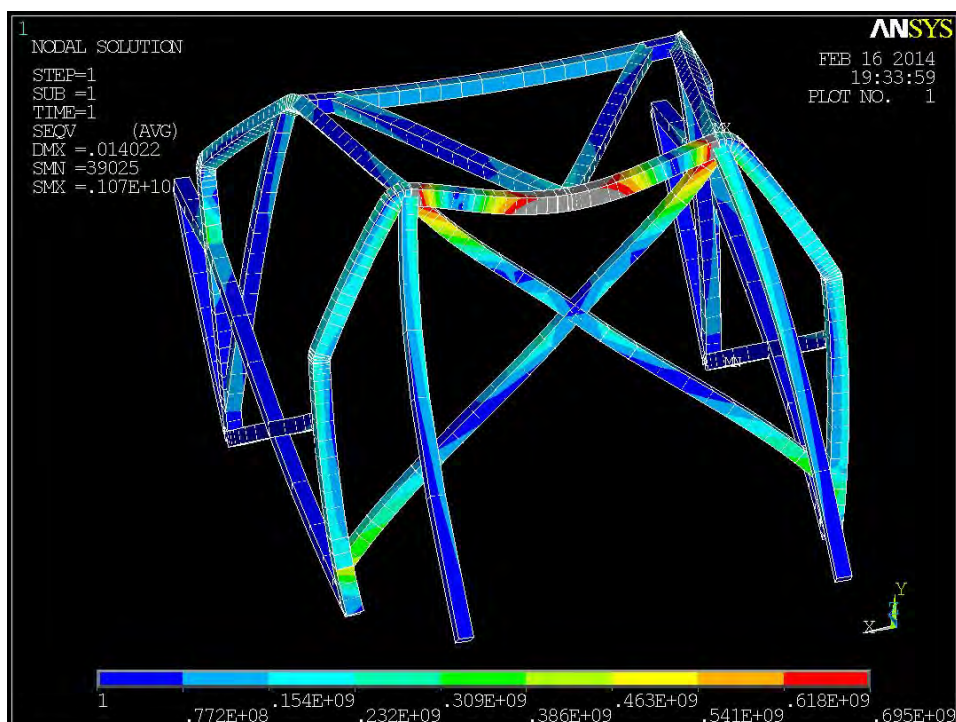


Ilustración 87 - Resultados tensionales con carga distribuida (1)

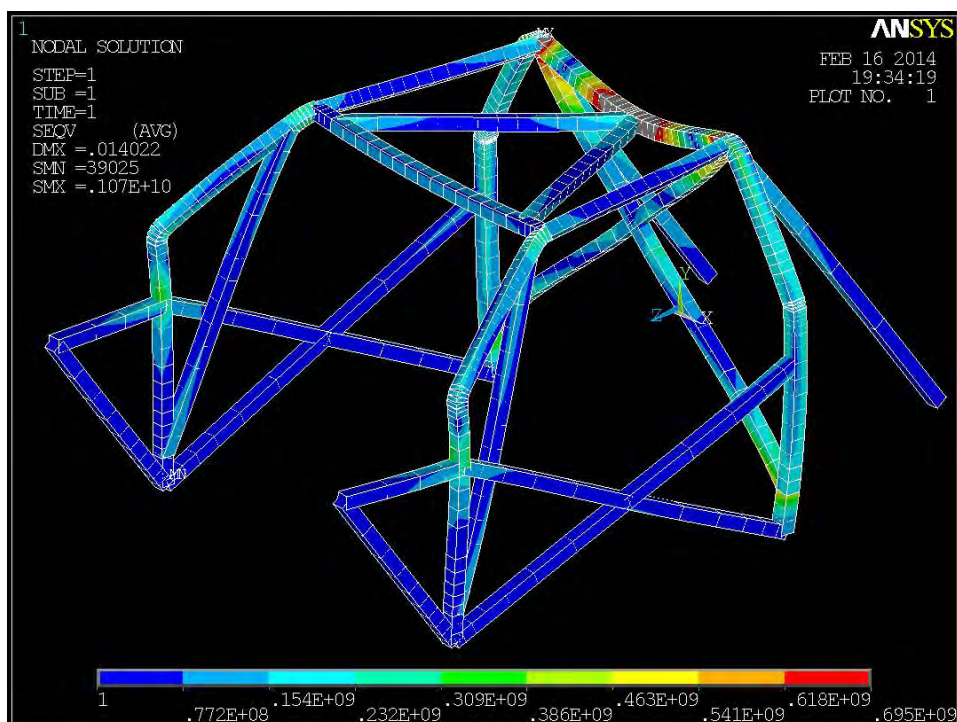


Ilustración 88 - Resultados tensionales con carga distribuida (2)



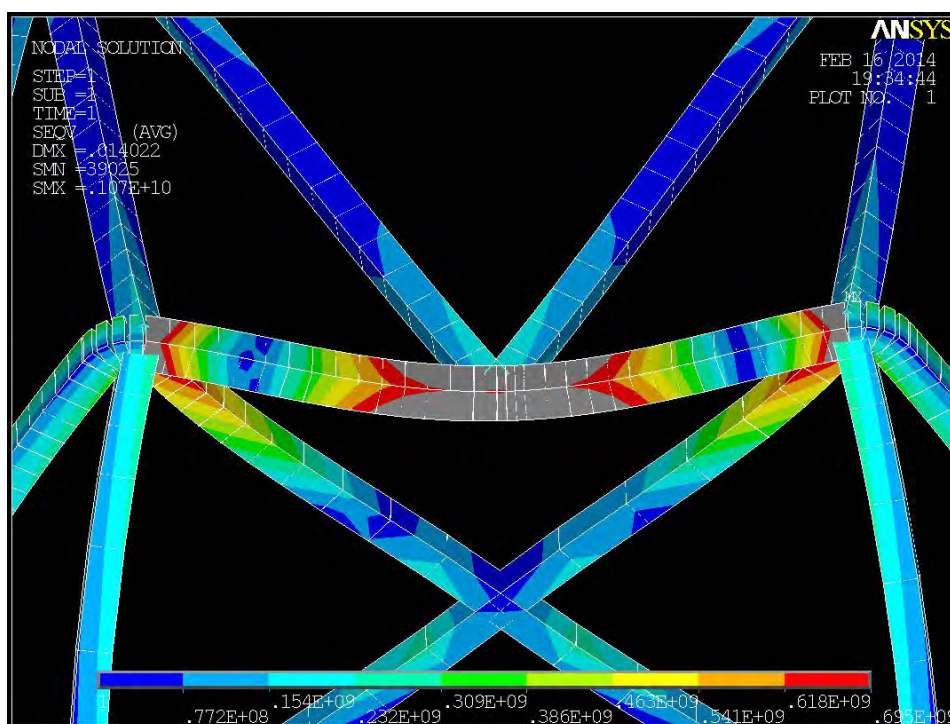


Ilustración 89 - Resultados tensionales con carga distribuida (3)

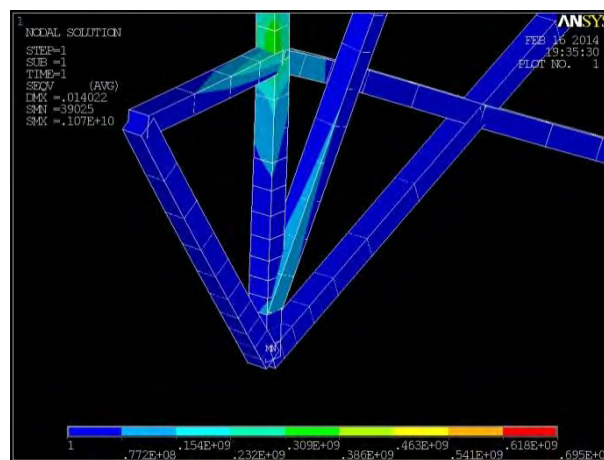
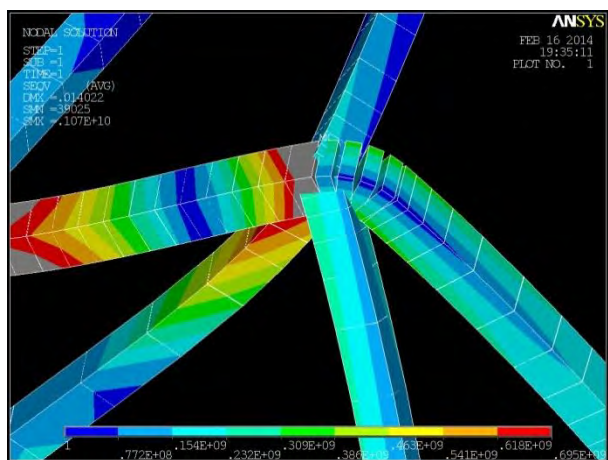


Ilustración 90 - Tensión máxima a la izquierda y mínima a la derecha

Se sabe de antemano que al utilizar elementos tipo Beam los resultados no son cien por cien fiables. Por lo tanto, como la zona de las uniones y la zona central de la barra son críticas, puesto que se supera el límite elástico del material, y se sabe de antemano que no se puede fiar de resultados en uniones con estos tipos de elementos, se propone realizar dos estudios, uno para cada ensayo, con elementos tipo Shell en las uniones. A través de esta propuesta aplicando elementos tipo Shell en las uniones se proporcionarán resultados más realistas para estas zonas de unión.

## 7.2 ELEMENTOS TIPO SHELL

En este apartado se va a realizar un diseño con elementos tipo Shell en las zonas más críticas que se estudiaron en el apartado anterior, es decir, en las uniones. Debido a que los resultados del ensayo 2 arrojan que tanto en las uniones de barras como en la parte central de la barra horizontal del arco principal se supera el límite elástico del material. Por eso, se quiere realizar este estudio y ver cuál es el comportamiento verdadero de ambas zonas críticas.

Este apartado “7.2 Elementos tipo Shell” se va a tratar igual que en el capítulo “7.1. Elementos tipo Beam”, se explicará cómo se ha desarrollado el diseño, posteriormente como se realizarán los dos tipos de ensayos que exige el *anexo B* con referencia [14] y por último se explicarán los resultados dados por el programa.

### 7.2.1 MODELIZACIÓN ENSAYO 1 (CARGA PUNTUAL)

Respecto al modelo de la estructura, cuando se habla de elementos tipo Shell, se refiere a dibujar encima de la estructura que se utilizó para elementos tipo Beam el área que tienen las barras del modelo en las zonas de unión. Por lo tanto, el primer paso es abrir en el programa el archivo con el modelo explicado en el apartado “7.1.1 Modelización”. Una vez que se tiene en pantalla este archivo hay que dividir todas las barras que llegan a la unión donde se aplica la carga puntual por un punto. En la ilustración 91 se señalan las barras que se van a dividir.

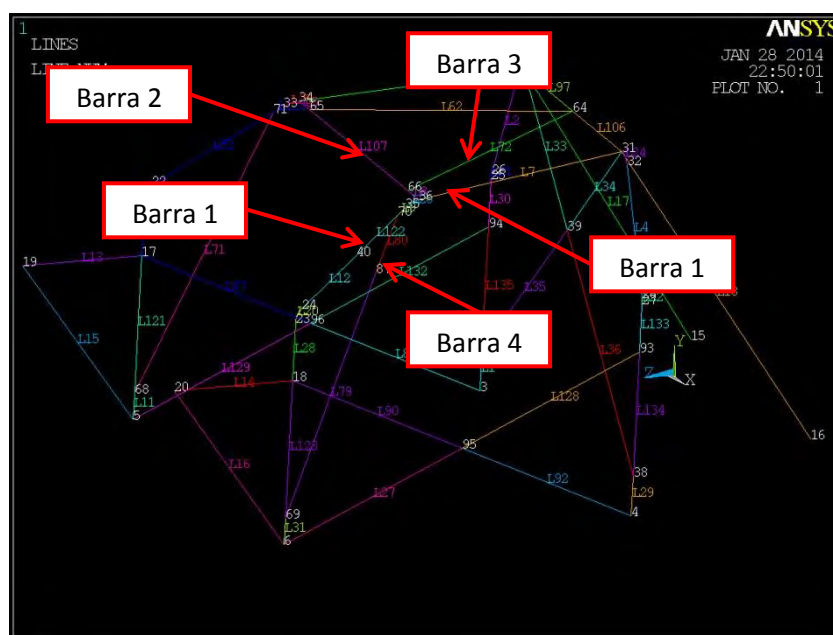
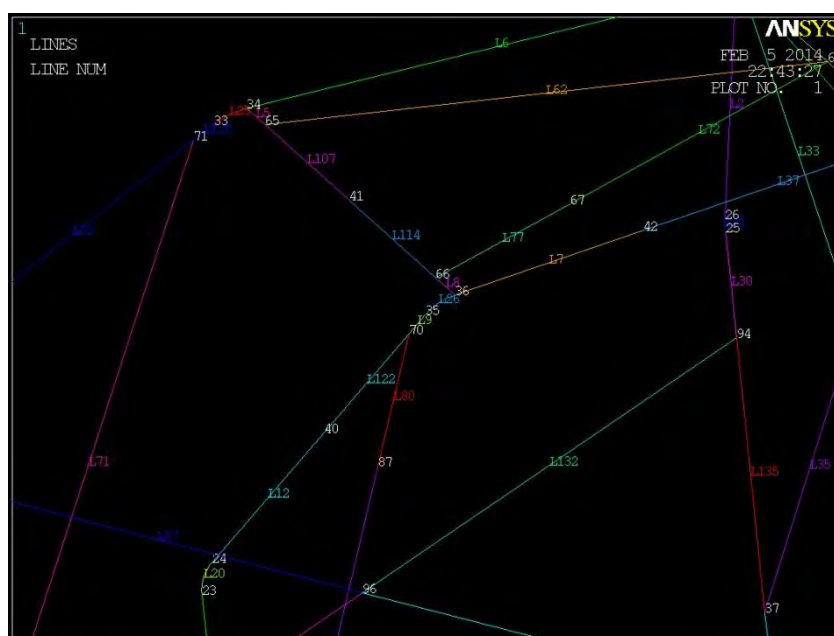


Ilustración 91 - Visualización de las barras a dividir

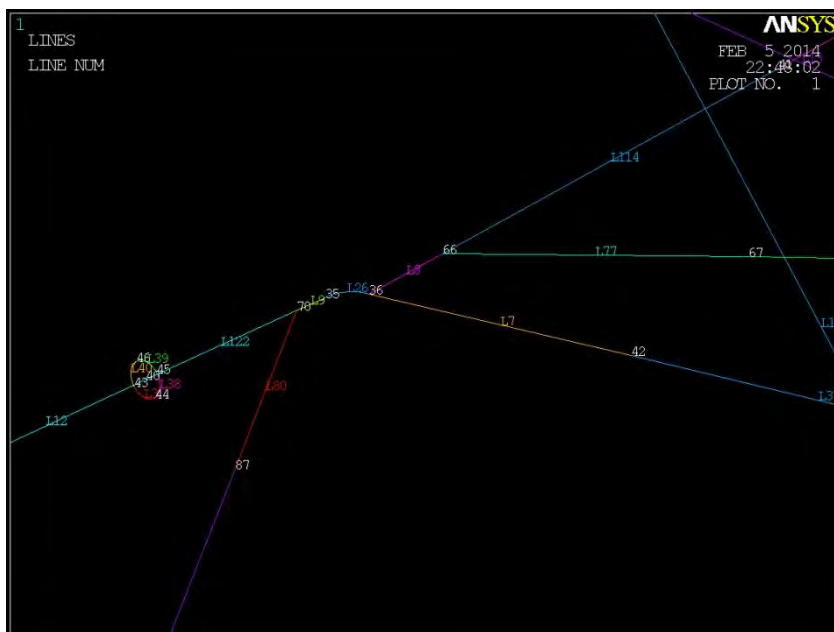
Para que se entiendan bien todos los pasos se va a seguir la secuencia que aparece en la ilustración 91, es decir, se empezará a trabajar con la barra 1, después con la 2 y así sucesivamente hasta la 4. El primer paso es dividir la línea 1 en dos líneas separadas por un KP, las dos líneas que se van a crear no es necesario que tengan una medida exacta pero si es conveniente dividir estas barras por la mitad, puesto que en la línea más próxima a la unión se va a crear el área de la barra. Por lo tanto, se sigue la secuencia Preprocessor/ Modeling/ Operate/ Booleans/ Divide/ Line into 2 Ln's, se selecciona la línea que se quiere dividir (barra 1) y por último señalar en qué punto de la línea se quiere hacer la partición. Después de realizar estos pasos aparecerá en pantalla que la línea inicial se ha dividido en dos separadas por un KP como se puede apreciar en la ilustración 92. Es conveniente hacer este paso del diseño a las 4 barras que llegan a la unión, para que a continuación se pase a dibujar los áreas de las líneas de manera individual.



**Ilustración 92 - División de todas las barras que llegan a la unión**

Volviendo a la barra 1, el siguiente paso es hacer visible el WP y alinearlo perpendicular a la barra por el KP que se ha definido al dividir. Para ello se hace Workplane/ Display Working Plane y después Worplane/ Align WP with/ Plane normal to line seleccionando la barra que vaya a ser normal al plano XY del WP. Una vez hecho esto se dibuja un área en el plano XY del WP que represente la sección de la barra, por lo tanto este área será un círculo cuyo radio es el radio medio del espesor. El radio medio de la barra es 18 milímetros puesto que el radio exterior tiene 20 milímetros y el radio interior 16 milímetros. Para dibujar el área se sigue la ruta Preprocessor/ Modeling/ Create/ Area/ Circle/ Solid Circle, se selecciona el KP donde se quiere poner el área y se introduce el valor de 0,018 metros que es el valor del radio medio. Y el

programa crea un área como el de la ilustración 93. Es importante aclarar que todos los valores que se introducen al programa deben de estar en el sistema internacional.



**Ilustración 93 - Área circular para crear las superficies de la barra 1**

Aunque en la imagen anterior sólo se observan las líneas que definen el área, en realidad sí existe la superficie del círculo. Los siguientes pasos son borrar sólo el área interior del círculo con la herramienta Preprocessor/ Modeling/ Delete/ Areas only y luego extruir las líneas de la circunferencia a lo largo de las líneas 122, 9, 26 y 7 que se ven en la imagen anterior. Para extruir las líneas se selecciona Preprocessor/ Modeling/ Operate/ Extrude/ Lines/ Along Lines, se eligen las cuatro líneas del círculo que se quieren extruir y después las 4 líneas de la estructura que hacen de espina de la extrusión. Se extruye este área a lo largo de las líneas 122, 9, 26 y 7 porque forman parte de la misma barra que es el semiarco lateral izquierdo. En la ilustración 94 se observan los áreas extruidos y en la 95 las líneas que forman dichas superficies.

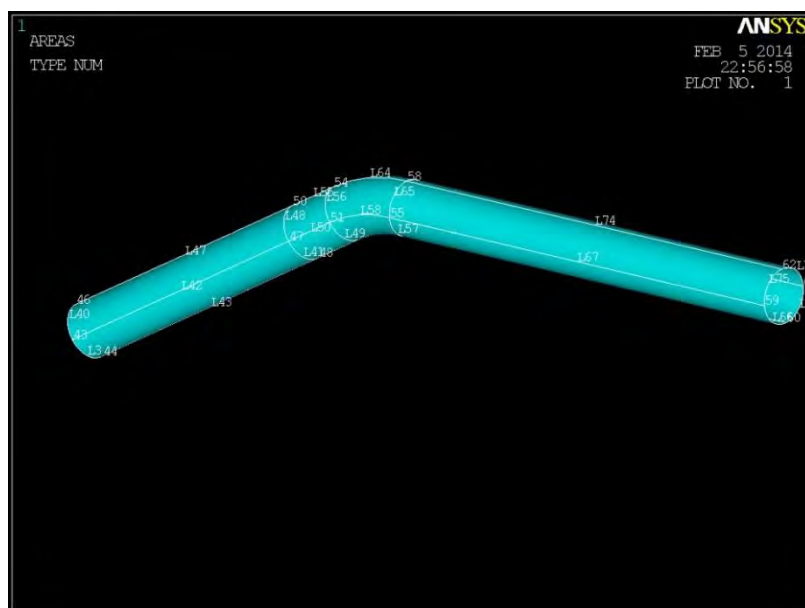


Ilustración 94 - Superficies extruidas de la barra 1

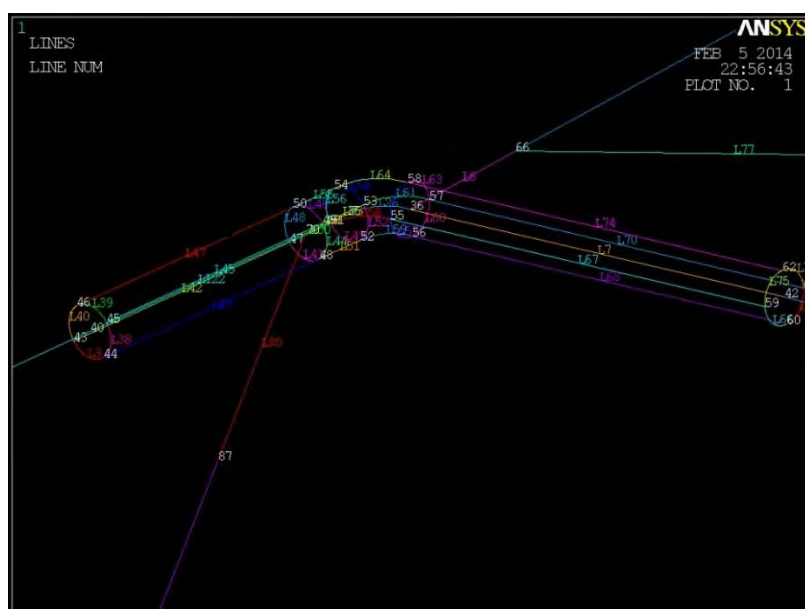
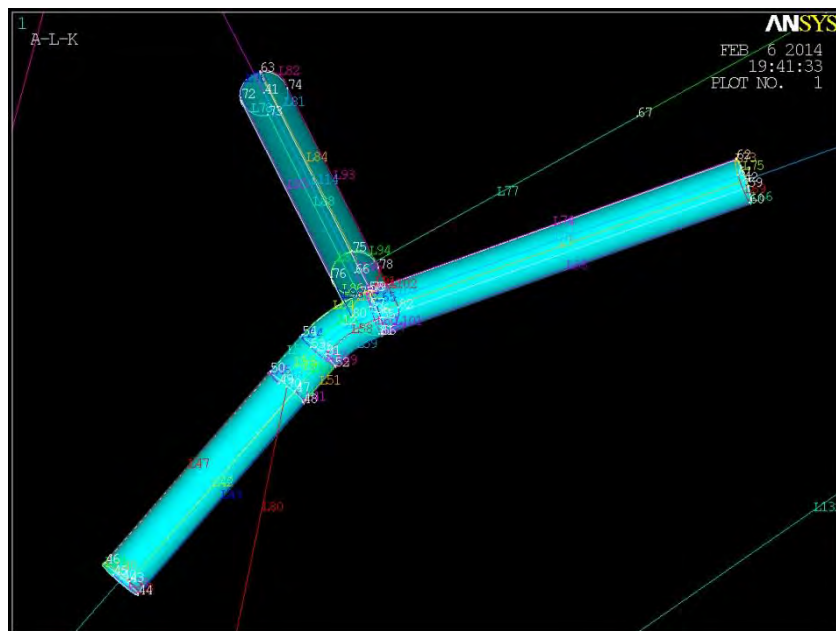


Ilustración 95 - Líneas que forman las superficies de la barra 1

Ahora se tiene que realizar el mismo procedimiento con la barra 2. Se ubica el WP de forma perpendicular a la línea por el KP y después se crea el área circular que va a definir la sección de esa barra. Al crear esta superficie se debe introducir un radio medio de 17,9 milímetros, esto se debe a que posteriormente cuando se corten dichas áreas daría error si se introducen el mismo radio medio para todas las áreas. Por este motivo se disminuye mínimamente el radio, y con esta metodología se introducirán todas las superficies de las barras necesarias. Este hecho no será sumamente transcendental para los resultados del modelo, puesto que, esta disminución de radio es mínima; en caso de que se hubiesen alterado estas diferencias de una manera desproporcionada el modelo no sería fiable. Por lo tanto volviendo al diseño, después

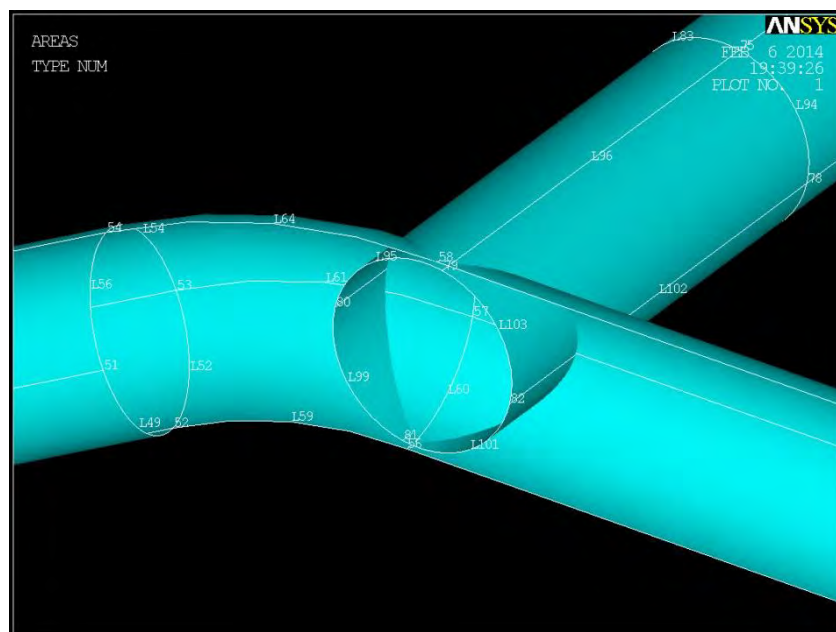


de introducir esta área a la línea se debe borrar la superficie y extruir las líneas resultantes que forman la circunferencia a lo largo de las líneas 114 y 8 que constituyen el miembro transversal. Quedando como resultado dos barras que se cortan como se muestra en la ilustración 96.



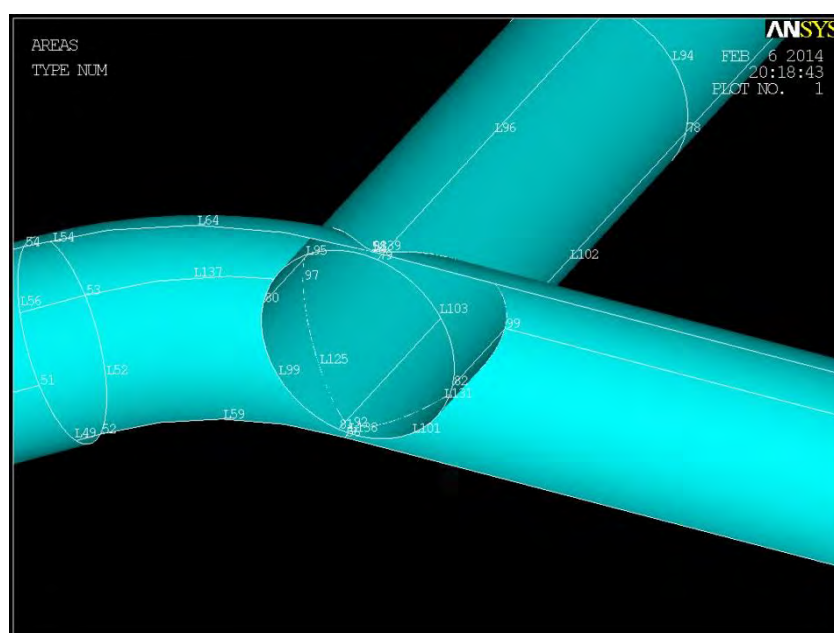
**Ilustración 96 - Superficies sin dividir de las barras 1 y 2**

El nuevo área se ha extruido hasta el extremo del miembro transversal y este punto coincide con la línea que pasa por el centro de la sección del semiarco delantero, por lo tanto estas superficies atraviesan el área que define la barra 1 como se aprecia en la ilustración 97.

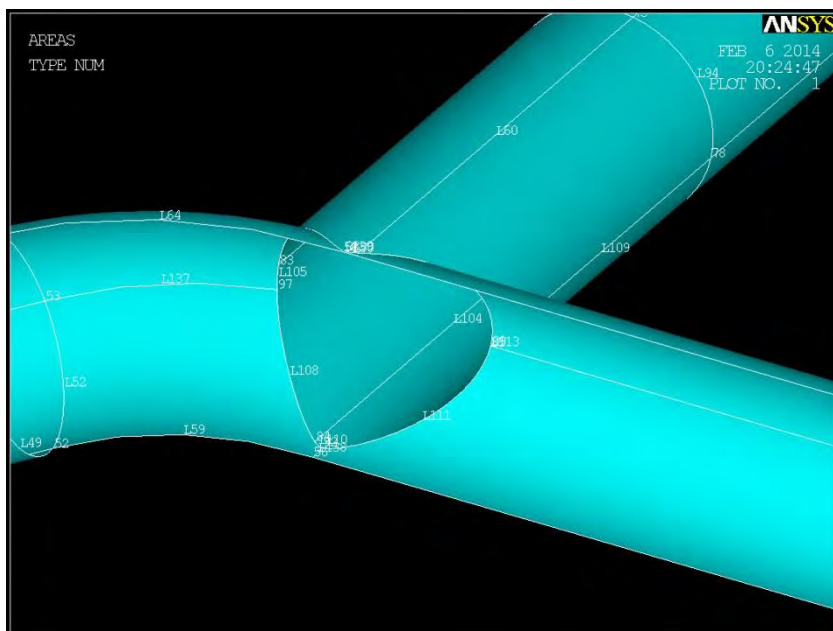


**Ilustración 97 - Superficies de la barra 2 atraviesa las superficies de la barra 1**

Para que el modelo no de problemas al mallarlo y ensayarlo se tienen que cortar los áreas sobrantes de la geometría de la barra 2. Para llevar a cabo esta acción se copian las superficies de la barra 2 siguiendo la ruta Preprocessor/ Modeling/ Copy/ Areas. Ahora se elige la herramienta Preprocessor/ Modeling/ Operate/ Booleans/ Divide/ Area by Area, se seleccionan todos los áreas de la barra 1, se pulsa OK y por último se escogen las superficies de la barra 2. Una vez hecho esto el programa ha dividido las superficies de la barra 1 con las áreas de la barra 2, definiendo estas zonas sobrantes como áreas independientes delimitadas por líneas, como se muestra en la ilustración 106. El siguiente paso es borrar los áreas de la barra 1 que cortan la circunferencia de la barra 2 para que dicho elemento este totalmente hueco, para esto se sigue Preprocessor/ Modeling/ Delete/ Area and Below y se eligen las cuatro superficies, ilustración 98.

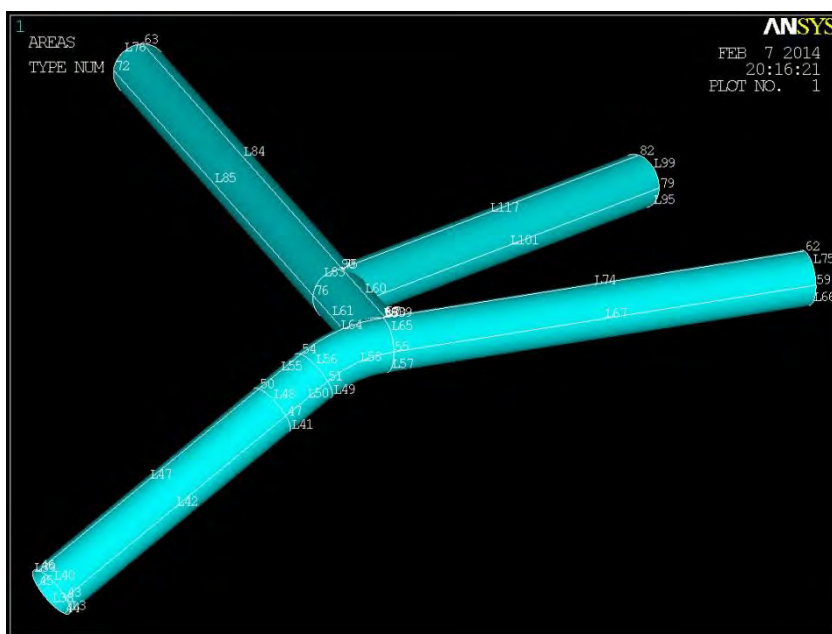






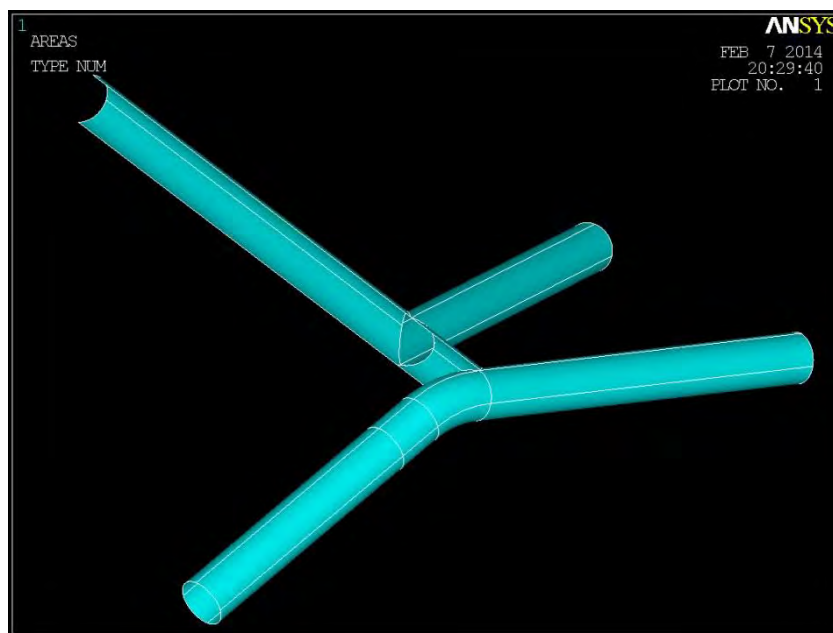
**Ilustración 99 - Segunda operación de dividir entre las barras 1 y 2**

Este mismo procedimiento se tiene que realizar con las barras 3 y 4 de la estructura. Se divide la barra 3 en dos partes separadas por un KP, se alinea el WP perpendicular a dicha barra y coincidente con el KP creado. Una vez que el WP está ubicado correctamente se crea un área de radio medio 17,8 milímetros y se elimina el área de la circunferencia quedando sólo las líneas del perímetro del círculo. A continuación se extruyen dichas líneas a lo largo de la mitad de la barra 3, estas nuevas superficies deben cortar a las áreas de la barra 2 como muestra la ilustración 100.



**Ilustración 100 - Superficies sin dividir de las barras 2 y 3**

Una vez creadas las superficies de esta barra, se deben dividir con las áreas de la barra 2, solamente se fraccionan estas dos barras porque son las únicas que se cortan en este paso. Después de dividir las se borran las áreas de la barra 2 delimitadas por la sección de la barra 3, por lo tanto, este último componente queda hueco. Y por último sólo queda dividir las áreas sobrantes de la barra 3 que cortan las superficies de la barra 2 y eliminarlos del modelo, ilustración 101. Cuando se han realizado todos estos pasos la barra 3 queda completamente adaptada al resto de componentes para ser mallada y ensayada satisfactoriamente.



**Ilustración 101 - Superficies de las barras 2 y 3 divididas**

Para terminar el modelo sólo falta realizar estos mismos pasos para la barra 4. En este caso el radio medio de la sección de esta barra sería 17,7 milímetros y al realizar la operación de dividir superficies sólo entran en juego las barras 1 y 4. Llevadas a cabo todas las indicaciones que se han descrito en este apartado, la unión del miembro transversal con el semiarco lateral izquierdo y con un refuerzo del techo queda totalmente definida como se indican en las ilustraciones 102 y 103.

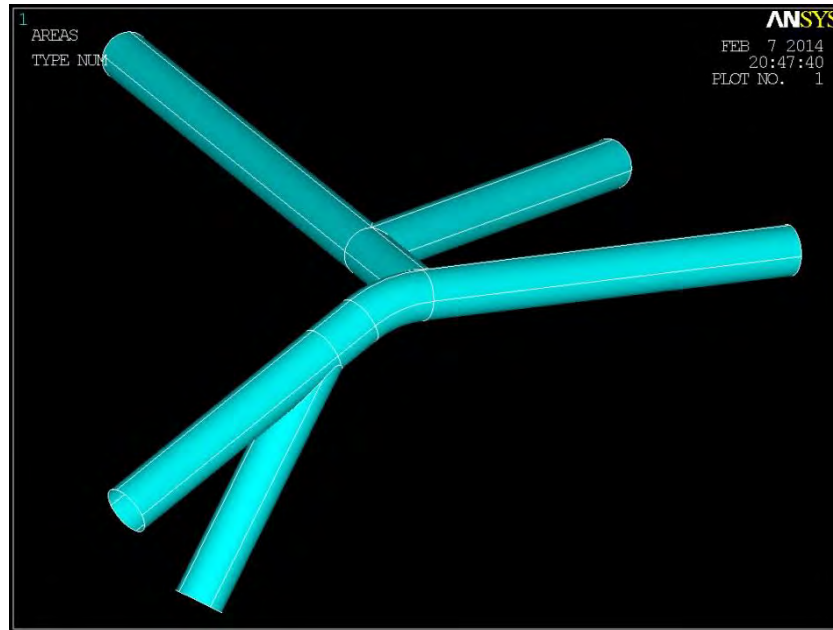


Ilustración 102 - Superficies de las barras de la unión 1

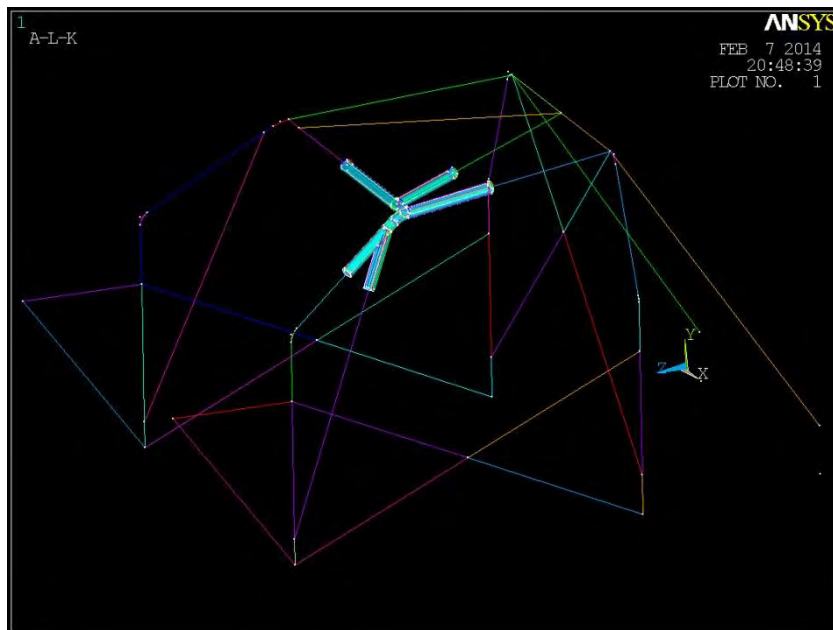


Ilustración 103 - Superficies de las barras de la unión 1

Para que el programa arroje resultados tensionales y de desplazamientos sólo falta realizar el análisis de la estructura que se ejecuta en el siguiente capítulo.

## 7.2.2 ANÁLISIS ENSAYO 1 (CARGA PUNTUAL)

En este apartado se va a definir el análisis realizado al modelo de la estructura con elementos tipo Beam. Para tener bien definidos los pasos a seguir se numeran a continuación las acciones a realizar:

- 1 Crear un Type 1 para elementos tipo Beam que será el mismo que se definió en el apartado “7.1.2 Análisis ensayo 1 (carga puntual)” y un Type 2 para los nuevos elementos tipo Shell.
- 2 Definir las constantes reales de ambos tipos de elementos.
- 3 Asignar los dos tipos de elementos Beam a las barras de 40 y 45 mm de diámetro exterior y los elementos tipo Shell a las áreas.
- 4 Mallar cada tipo de elemento por separado.
- 5 Unir las líneas y áreas del modelo con elementos. Porque al ser figuras geométricas diferentes, el programa supone que la estructura no es continua y al dar los resultados refleja en dichas zonas un salto de discontinuidad.
- 6 Introducir restricciones de desplazamientos en los anclajes del modelo.
- 7 Definir el valor de la carga y ubicarla en la zona correcta del modelo.

Una vez que han quedado claras la secuencia de acciones para realizar correctamente el modelo se empieza a crear los tipos de elementos. Para crear ambos elementos se sigue la ruta Preprocessor/ Element Type/ Add\_Edit\_Delete, a continuación para elementos tipo Beam se elige la opción Beam/ 3D elastic 4 y para elementos tipo Shell se escoge Shell/ Elastic 4 Node 63, ilustración 104. Cuando se han elegido los dos tipos en la pantalla general de “Element Type” deben aparecer los tres elementos asignados, un “Type 1” y un “Type 3” para los elementos “Beam” y un “Type 2” para “Shell”, ilustración 105.

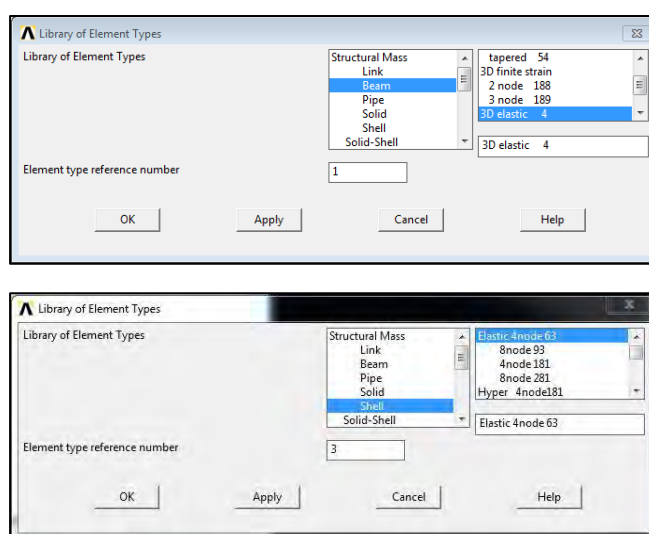
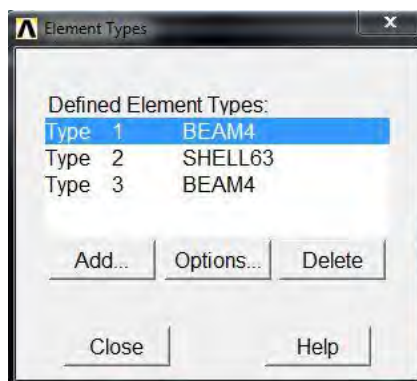


Ilustración 104 - Beam arriba y Shell abajo



**Ilustración 105 - Todos los elementos del modelo**

Ya se han seleccionado que tipo de elementos se van a usar para este modelo, pero ahora según indica el paso 2 hay que asignar sus constantes reales para que el programa sepa con qué tipo de sección se está trabajando. Para definir estas características se elige la herramienta Preprocessor/ Real Constants/ Add\_Edit\_Delete. Para elementos tipo Beam se utilizan las mismas constantes que en el apartado “7.1.2 Análisis ensayo 1 (carga puntual)” porque se utilizan las mismas barras, es decir, los datos que se especifican a continuación:

Área

$$\text{Área} = 4,524 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{Área} = 5,152 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Momento de inercia

$$I_y = I_z = 7,42 * 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$I_y = I_z = 1,093 * 10^{-7} \text{ m}^4$$

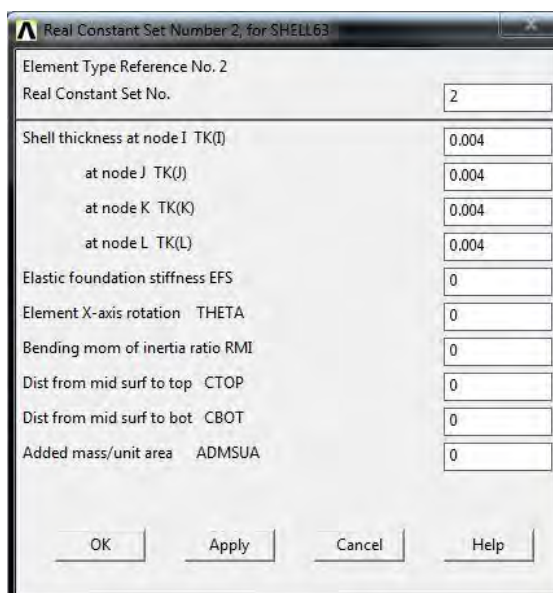
Momento de inercia torsional

$$I_0 = I_z = 1,848 * 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$I_0 = I_z = 2,286 * 10^{-7} \text{ m}^4$$

Ahora ya se ha creado el “Set 1” y el “Set 3” que corresponden a Beam. Se observa en las ilustraciones 58 y 59 la disposición de estos valores en la ventana de asignación de constantes reales para elementos Beam. Ahora se definen las constantes reales de los elementos Shell. En la ventana de “Real Constants” para Shell se introduce el valor del espesor de las barras en todos los apartados de “Shell thickness at node” como muestra la ilustración 106. El espesor es 4 milímetros y sólo se introduce este dato porque la geometría de la sección ya se ha definido en el modelo cuando se han dibujado las áreas de las barras. Es decir, el programa ya sabe que tiene

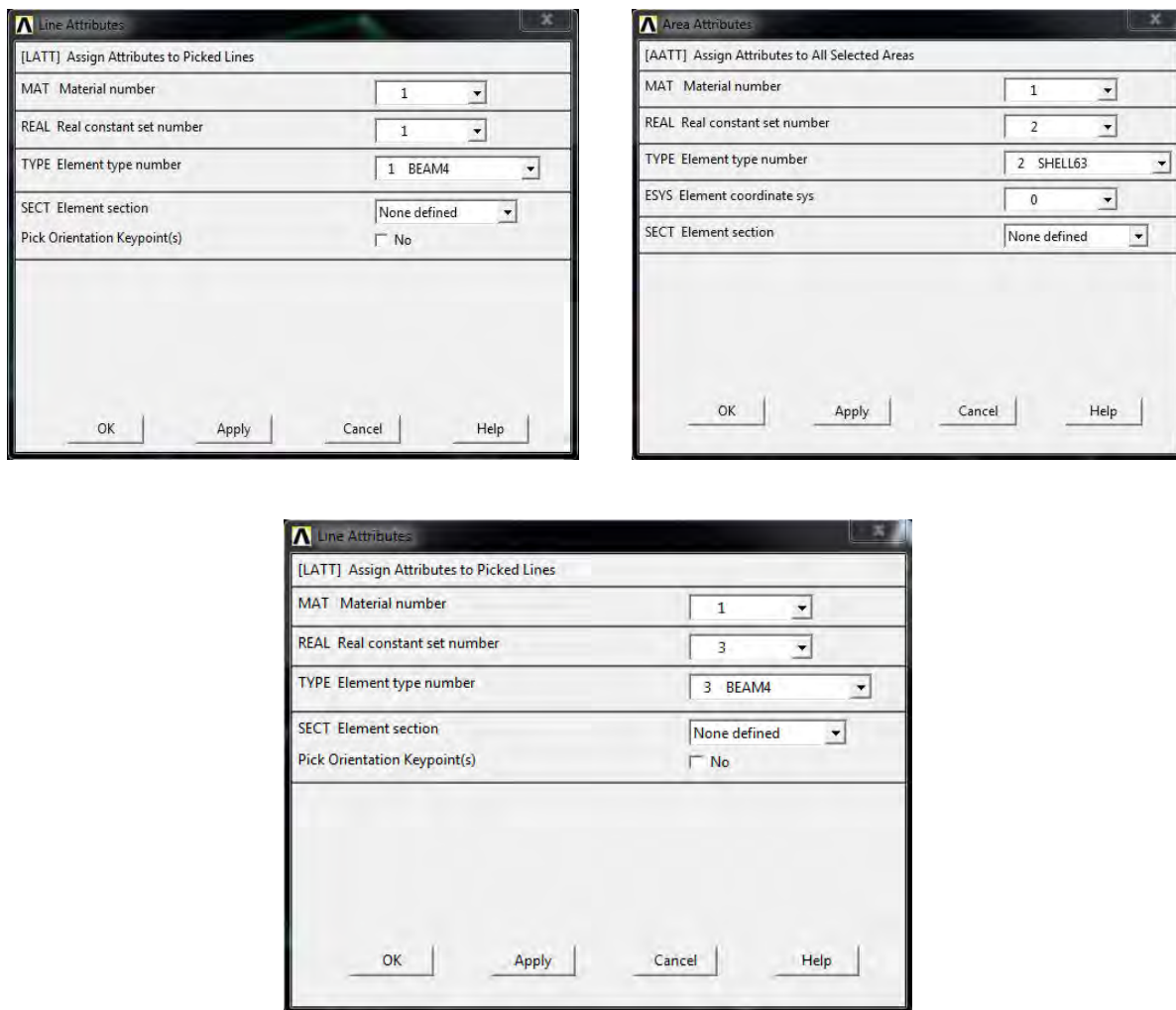
que trabajar con un radio medio de 18 milímetros, porque se han realizado las superficies con este valor, por lo tanto, si se le indica que debe tener un espesor de 4 milímetros el programa calcula que el modelo posee un radio exterior de 20 milímetros y un radio interior de 16 milímetros en las zonas donde se han introducido áreas. Con los datos que se acaban de introducir para los elementos Shell se ha creado el Set 2.



**Ilustración 106 - Valores para definir los elementos Shell**

Con las secciones de las barras definidas correctamente en el programa se puede pasar al paso 3 donde se asigna que las líneas deben trabajar con elementos Beam y las áreas trabajan con elementos tipo Shell. El programa normalmente asigna automáticamente cada tipo de elemento a cada parte del diseño, pero siempre es bueno definirlo por si acaso hubiese algún error a la hora de arrojar resultados. Para realizar esta operación se sigue la ruta Preprocessor/ Modeling/ Meshing/ Mesh attributes. Ahora para definir los elementos Beam referentes al “Set 1” se elige “Picked Lines”, se seleccionan todas las líneas menos las pertenecientes al arco principal y a áreas y aparece en pantalla una ventana donde se elige material número 1, Set número 1 y elementos BEAM4, como muestra la ilustración 107. Para definir los elementos Shell se escoge “All Areas” y aparece la misma ventana que antes, pero ahora se elige material número 1, Set número 2 y elementos SHELL63, como muestra la ilustración 107. Por último para otorgar el “Set 3” se selecciona material número 1, Set 3, elementos BEAM4 y se seleccionan las líneas del arco principal.

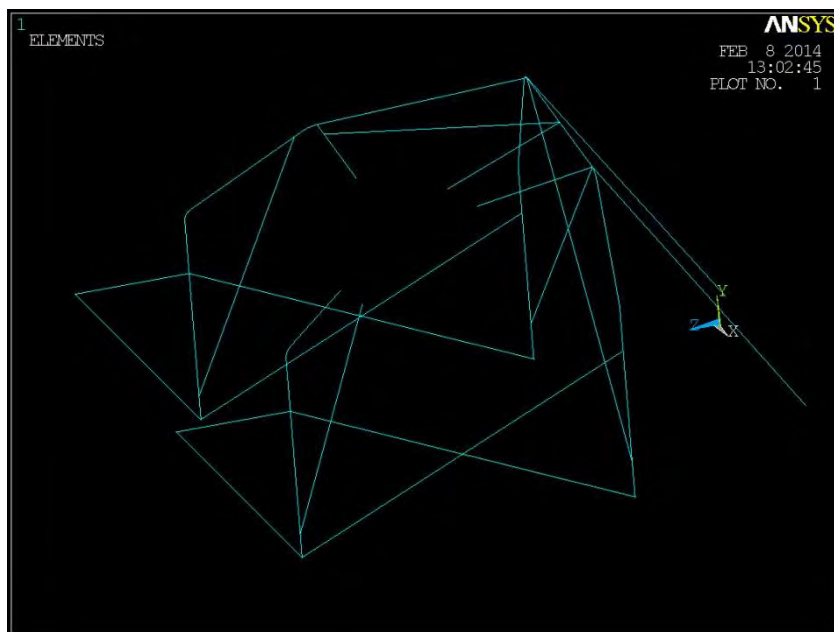




**Ilustración 107 - Ventanas de atributos para Type 1, 2 y 3**

En el paso 4 se tienen que mallar por un lado las líneas y por otro lado las superficies de la unión. Para ello se sigue la ruta Preprocessor/ Modeling/ Meshing/ Mesh Tool, en la ventana que aparece se elige en el apartado “Mesh” la opción “Lines” y se seleccionan todas las líneas del diseño menos las pertenecientes a las áreas. A continuación, aparece en pantalla todas las líneas del modelo de color azul, esto significa que se han mallado como se observa en la ilustración 108.

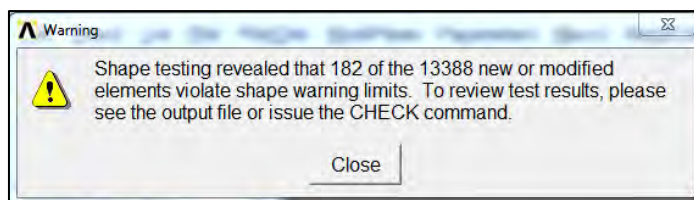




**Ilustración 108 - Mallado de los elementos Beam**

Para mallar las áreas se escoge en el apartado “Mesh” la opción “Areas”. En “Shape” se elige “Quad” y “Free” para que la malla tenga elementos con geometría cuadrada y su distribución sea libre. Y en la sección “Smart Size” se desplaza la barra hasta ubicarla en el número 3, esto se realiza para que la malla tenga elementos más pequeños, puesto que con elementos de tamaño menor los resultados son más exactos. Después de elegir estas características de la malla se seleccionan todas las áreas del modelo y el programa empieza a mallar.

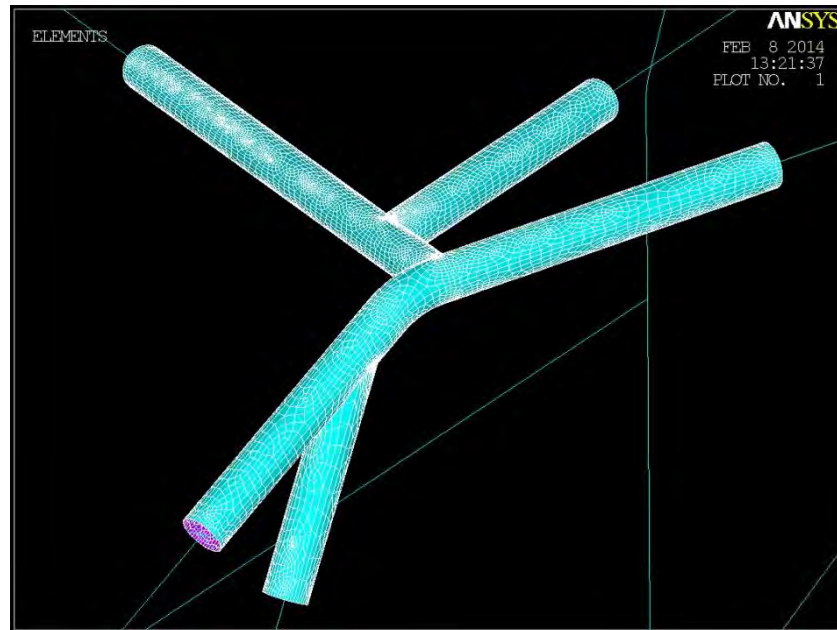
Después de realizar la malla el programa arroja en pantalla un “Warning”, ilustración 109. Este mensaje indica que 182 elementos de los 13388 que posee la malla no cumplen el test de forma. Este hecho puede alterar los resultados del modelo, pero se puede obviar debido a que es un porcentaje muy bajo de elementos erróneos (1,35%) y no tendrá transcendencia a la hora de fiarse de los resultados.



**Ilustración 109 - Aviso al mallar las áreas**

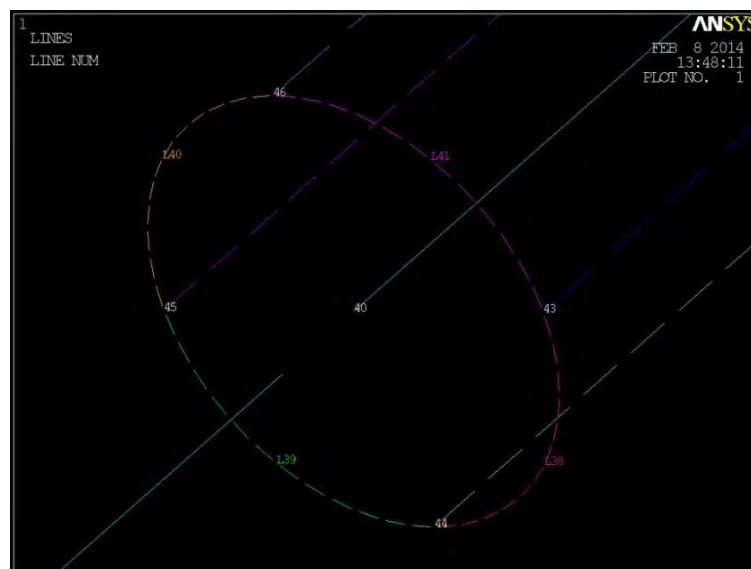
En la ilustración 110 se puede observar la geometría de la malla de las superficies de la unión. Dicha malla parece correcta porque no tiene ninguna zona de

nodos que sean excesivamente grandes respecto otros ni hay zonas del modelo que no estén malladas.



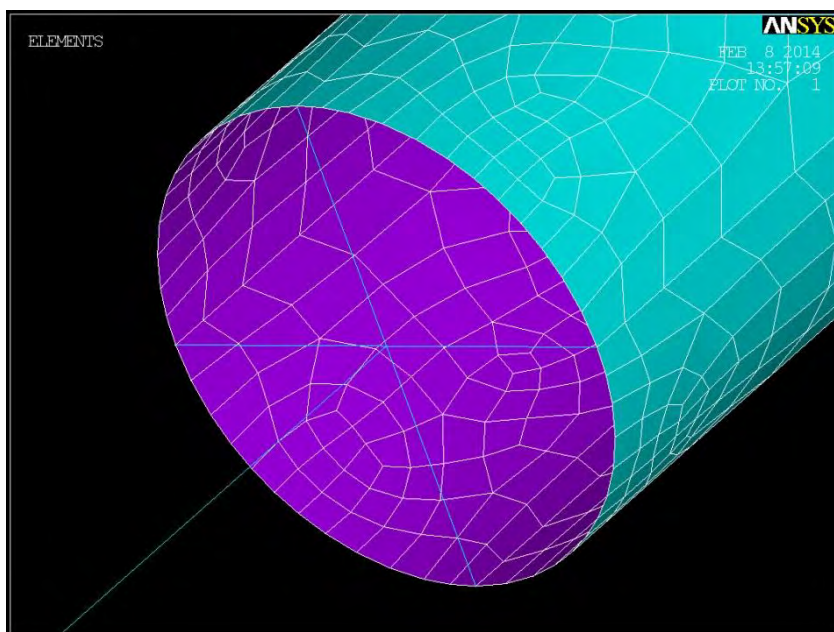
**Ilustración 110 - Mallado de las áreas**

Una vez que el modelo ha sido mallado hay que pasar al paso 5 en el cual se van a unir los elementos tipo Beam y Shell. Esta unión se va a realizar con elementos lineales, los cuales van a unir el último nodo de las líneas de elementos tipo Beam con cuatro nodos del inicio de las superficies de elementos tipo Shell. Los cuatro nodos de las superficies van a coincidir con el inicio de las cuatro líneas que definen las áreas; en la ilustración 111 se refleja gráficamente de que nodos se están hablando.



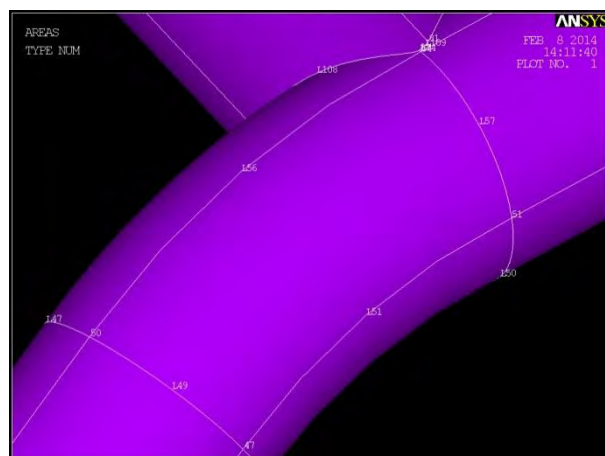
**Ilustración 111 - Nodos de elementos Beam y Shell a unir**

Como se observa en la ilustración 111 se unirá el nodo 40 que pertenece a la línea con los cuatro nodos que pertenecen a las líneas que definen las superficies de las barras, es decir, con los nodos 43, 44, 45 y 46. Para unir los nodos se sigue la ruta Preprocessor/ Modeling/ Create/ Elements/ Auto Numbered/ Thru Nodes. Esta operación se tiene que realizar en 5 ocasiones porque hay 5 saltos de elementos Beam a Elementos Shell. En la ilustración 112 se muestra un ejemplo de cómo quedaría unidos todos los elementos. A la hora de analizar los resultados se sabe de antemano que en estos puntos la tensión va a resultar mucho mayor que en otras zonas de las superficies. Esto es debido a que son singularidades de tensión, por lo tanto, no se tendrán en cuenta a la hora de analizar el valor de la tensión máxima.



**Ilustración 112 - Elementos que unen la parte Beam y Shell**

A continuación, en el paso 6 se tiene que imponer restricciones de desplazamientos en los ejes X, Y, Z en los 8 pies de anclajes que posee el diseño de la estructura. Y por último en el paso 7 se define y se ubica la carga en el modelo. La carga puntual se introduce en la unión del miembro transversal con el semiarco lateral izquierdo, pero en este modelo esa unión está modelizada con superficies, por lo tanto, se tiene que situar la carga en todos los nodos de un área. Esta área es el definido por las líneas 49, 51, 56 y 57 que se puede observar en la ilustración 113.



**Ilustración 113 - Área donde se ubica la carga puntual**

Por lo tanto, antes de ubicar la carga, se debe calcular que proporción de la fuerza tiene cada nodo de dicha superficie porque se aplica la carga en nodos en el programa. Para ello se selecciona el área con la opción Select/ Entities. Después con el área en pantalla hay que seleccionar los nodos de dicha superficie eligiendo la misma opción de selección pero ahora en la ventana se escoge “Nodes”, “Attached to”, “Areas interior” y “Reselect”. Posteriormente se elige Plot/ Nodes y aparecen en pantalla los 72 nodos que definen esta superficie. Por lo tanto, el valor de la carga en cada nodo es el siguiente:

$$F_{\text{por nodo}} = \frac{41475 \text{ N}}{72 \text{ nodos}} = 576,05 \text{ N/nodo}$$

$$F_x = - 576,05 * \sin 25^\circ = -243,5 \text{ N/nodo}$$

$$F_y = - 576,05 * \cos 25^\circ * \cos 5^\circ = -520,1 \text{ N/nodo}$$

$$F_z = - 576,05 * \cos 25^\circ * \sin 5^\circ = -45,5 \text{ N/nodo}$$

Para introducir la carga se sigue la ruta Preprocessor/ Loads/ Define Loads/ Apply/ Structural/ Force\_Moment/ On Nodes y se introduce cada valor de la fuerza en su eje correspondiente. En la ilustración 114 se observa la distribución de las cargas y reacciones en cada nodo y en la ilustración 115 el modelo completo con los elementos, nodos, cargas y restricciones.

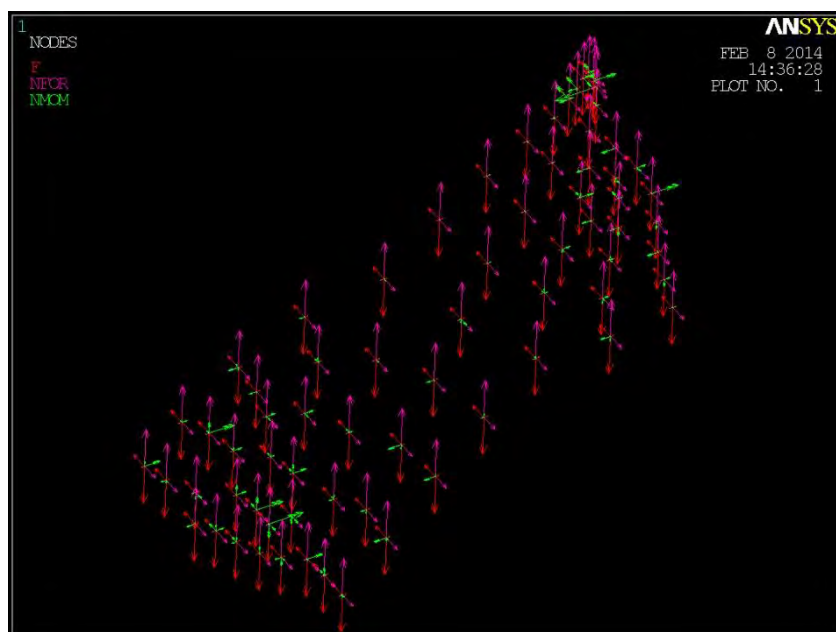


Ilustración 114 - Carga puntual

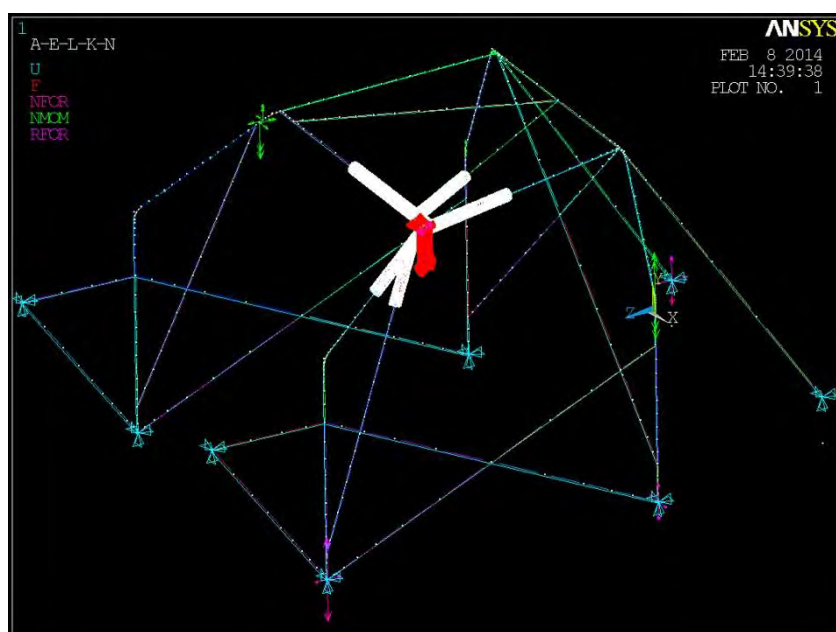


Ilustración 115 - Estructura con carga puntual

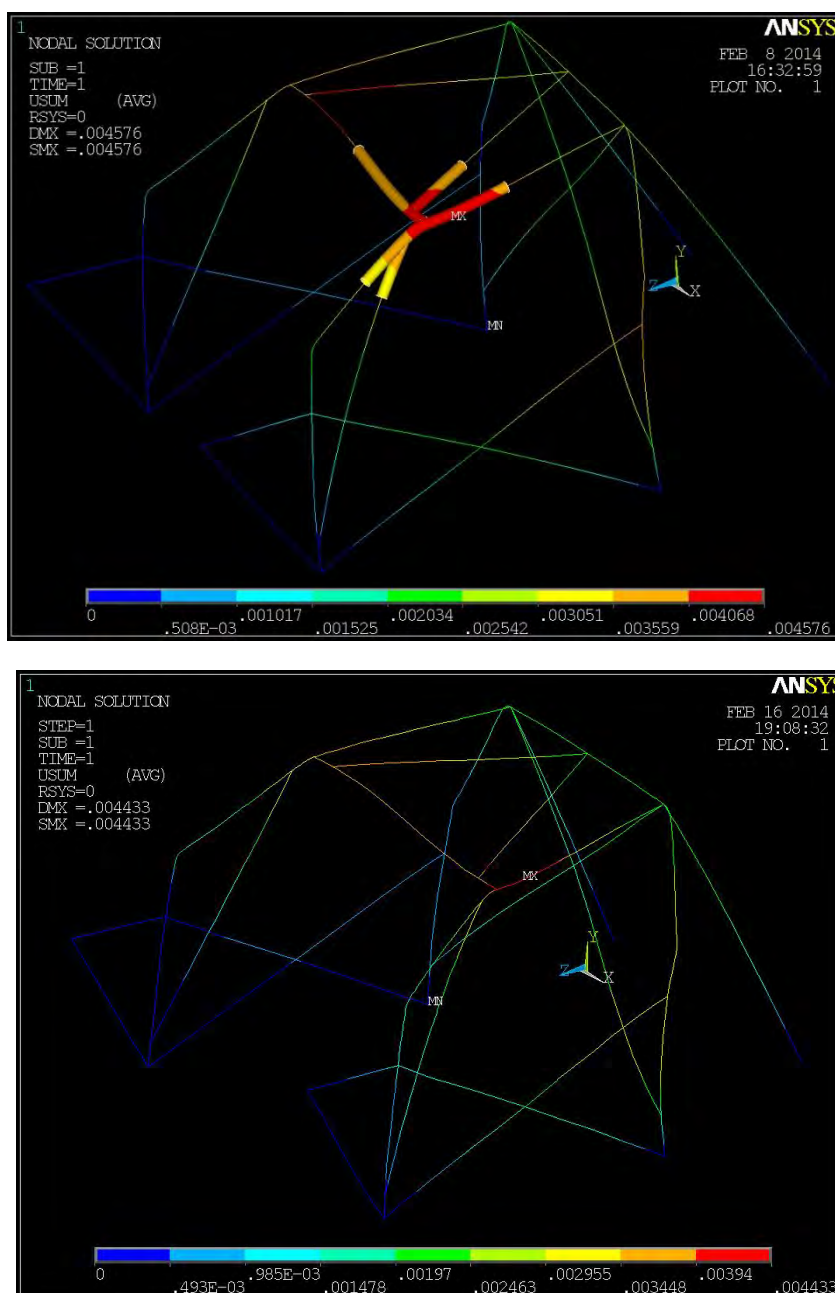
Con todos estos pasos el modelo ha quedado totalmente definido, ahora solo falta resolver y el programa arrojará los resultados.

### 7.2.3 RESULTADOS ENSAYO 1 (CARGA PUNTUAL)

Como se puede observar en la imagen superior de la ilustración 116 la deformada del modelo es correcta puesto que el mayor desplazamiento se produce en



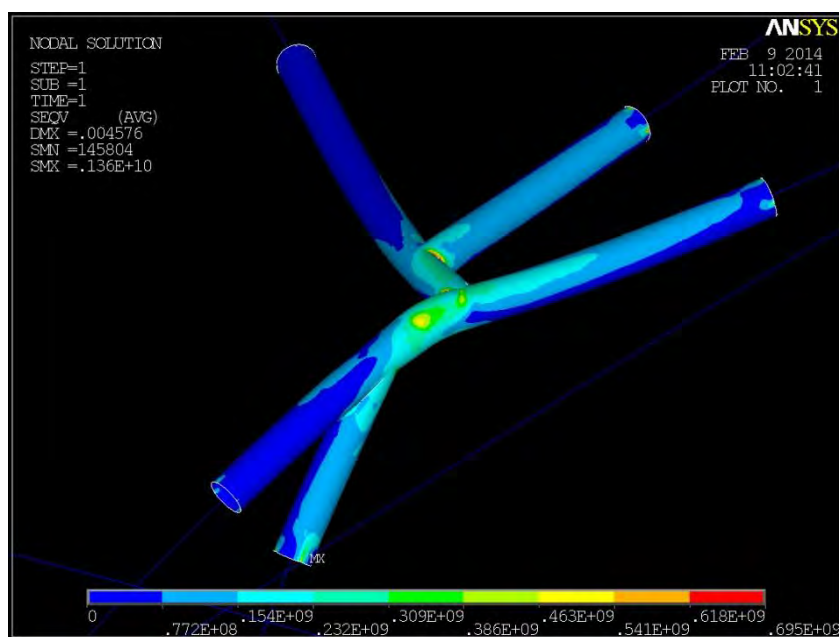
la unión que se ha modelizado, es decir, en la zona de aplicación de la carga puntual. En las franjas más cercanas a dicha zona el valor del desplazamiento va disminuyendo hasta las partes de la estructura más alejadas como son la parte inferior de la estructura donde se sitúa los pies de anclaje. Si se compara con la deformada del apartado “7.1.3 Resultados análisis 1 (carga puntual)” se observa que son idénticas y trabajan de una forma muy similar, este hecho es correcto puesto que no se ha modificado nada del diseño, es decir, las dimensiones de las barras son las mismas y la carga es igual.



**Ilustración 116 - Resultados de desplazamientos con carga puntual con elementos Beam y Shell arriba y con elementos beam sólo abajo**

El valor máximo de desplazamiento en el modelo de elementos Shell es de 4,576 milímetros y se sitúa en el área donde se ha aplicado la carga puntual. La localización de este desplazamiento máxima es lógica porque está localizada en dicho área y además coincide con la zona del apartado 7.1.3. Como se puede observar en la ilustración 116, los valores de los desplazamientos máximos también son muy parecidos tanto en este modelo con elementos Shell como en el modelo de elementos Beam del apartado 7.1.3 donde el valor máximo es 4,433. Por lo tanto, respecto un análisis de desplazamientos se puede decir que la estructura es válida con el ensayo 1 de carga puntual, porque ni en el modelo de elementos Beam ni en este modelo con elementos Shell se supera el valor máximo de desplazamiento de 100 milímetros.

En la ilustración 117 se representa la distribución de tensiones en la unión del modelo de elementos Shell. Como se puede observar la dispersión de los valores de las tensiones ilustradas con cada color son homogéneas y se reparten a lo largo de los áreas del modelo de forma lógica, puesto que los colores más cálidos, que representan mayores tensiones, se sitúan en la superficie de aplicación de la fuerza y según se aleja de dicha zona las tensiones van disminuyendo.



**Ilustración 117 - Resultados tensionales con elementos Beam y Shell**

El valor máximo de tensión que arroja el programa es 1360 MPa, este valor supera el límite elástico del material, imagen izquierda de la ilustración 118. Su posición coincide con el extremo de los elementos que se incorporaron para unir las zonas de elementos tipo Beam y las zonas con elementos Shell. Como se vaticinó en el capítulo anterior en estas zonas la tensión iba a ser mucho mayor que en el resto de



las superficies, por lo tanto, no se puede asegurar que en el ensayo no se supere el límite elástico del material.

Como se observa en la imagen derecha de la ilustración 118 otras zonas donde se supera el límite elástico de 695 MPa es en las soldaduras de las barras, pero estos puntos tampoco son fiables puesto que no se están modelizando concretamente. No se hace el análisis de la soldadura porque se sale del objetivo de este proyecto y ocuparía para elaborar otro proyecto.

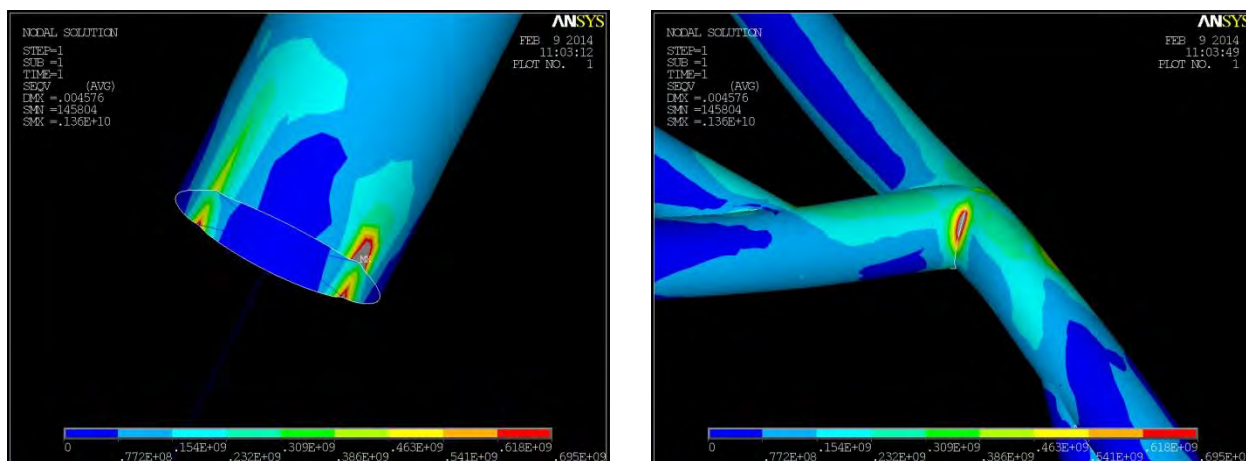


Ilustración 118 - A la derecha tensión máxima y a la izquierda tensión en soldadura

Para asegurar que no se alcanza el valor del límite elástico o se supera mínimamente en el modelo, se va a realizar la operación de deseleccionar en el modelo las zonas de unión de elementos Beam y Shell y ver que tensión máxima arroja el programa.

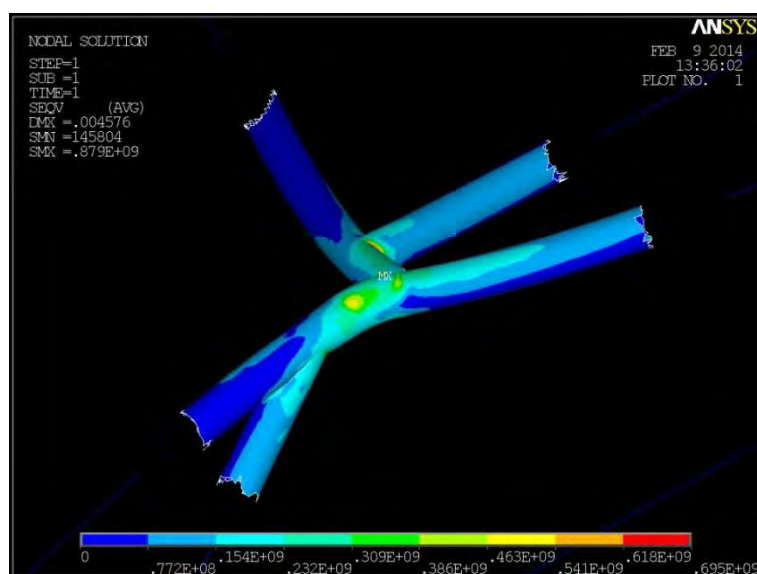


Ilustración 119 - Modelo sin elementos de unión Beam con Shell

Como se observa en la ilustración 119 la tensión máxima, restringiendo que el programa cuente con los elementos de las uniones, tiene un valor de 879 MPa. Este valor ha disminuido considerablemente acercándose mucho al límite elástico del material. Ahora este máximo se sitúa en una de las soldaduras de las barras, pero los valores en estos puntos no son fiables. Aunque la tensión máxima supere el límite elástico se puede dar el modelo como favorable porque la diferencia es muy pequeña y además se sitúa en una soldadura. Este ensayo no llega al límite de rotura de la estructura por lo tanto se puede estar tranquilo que la estructura soporta la fuerza.

Como último paso de verificación de la modelización de la unión se debe comparar el modelo con elementos Beam con el modelo de elementos Shell. En la ilustración 120, se ilustran la distribución de tensiones de ambos modelos y se puede apreciar que son muy parecidas. Se localizan valores de tensión iguales en ambos modelos.

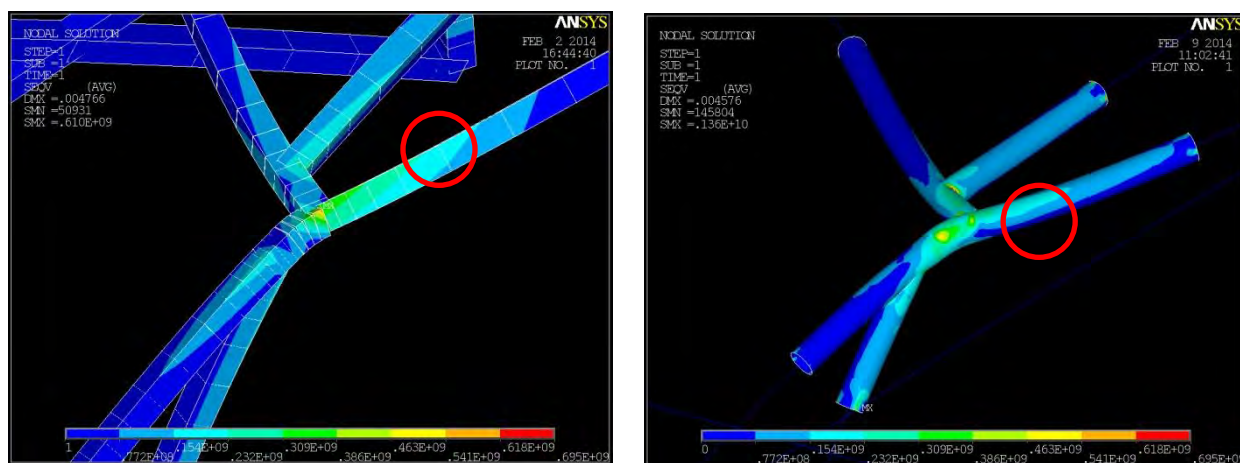


Ilustración 120 - Zonas de selección de un nodo para comparar valores de tensión

Para asegurarse cien por cien que ambos modelos trabajan igual y culminar la comparación se va a obtener el valor de la tensión de un elemento de cada modelo en las zonas que se marcan en la ilustración 120. El elemento elegido en el modelo de Beam tiene un valor de 136 MPa y el elemento del modelo de Shell posee 91,2 Mpa.

Para finalizar el análisis, se cataloga como correcto este modelo de elementos Shell en comparación con el modelo de elementos Beam. Y además esta unión está dentro de las restricciones que plantea el anexo B con referencia [14] para el ensayo de carga puntual tanto en el punto de vista de deformaciones como tensional.

## 7.2.4 MODELIZACIÓN ENSAYO 2 (CARGA DISTRIBUIDA)

El objetivo de este capítulo es realizar el modelo de la estructura del arco de seguridad pero modelizando con áreas la unión de la barra horizontal del arco principal con el semiarco lateral derecho. Para realizar dicho modelo se tiene que trabajar de la misma forma que se ha explicado en el apartado “7.2.1. Modelización ensayo 1 (carga puntual)”, con la diferencia de que en esta unión influyen otras 4 barras y con geometrías diferentes. Por lo tanto, no se explicará paso a paso cómo se ha construido este diseño al tener que operar de la misma forma. En la ilustración 121 se observan las barras que intervienen en la unión que se va a realizar a través de superficies.

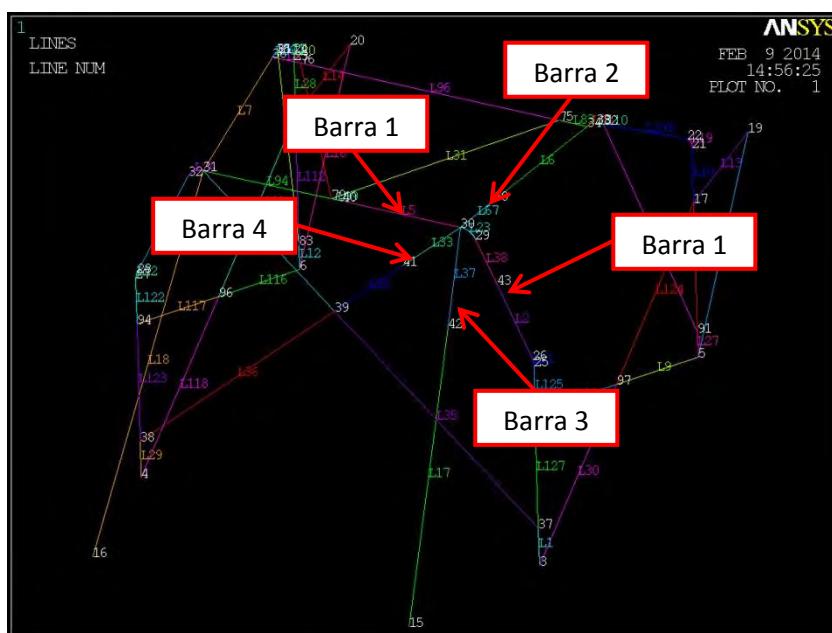


Ilustración 121 - Visualización de las barras a dividir

Para que el programa no de ningún fallo a la hora de dar resultados se deben dar valores de radio medio diferentes a las 4 líneas que entran en juego. La línea uno tiene un radio de medio de 20,5 milímetros, la línea 2 de 18 milímetros, línea 3 de 17,9 milímetros y línea 4 de 17,8 milímetros. Como se explicó anteriormente estos cambios de geometría no varían excesivamente los resultados del modelo.

En la ilustración 122 se observa cómo queda este diseño:

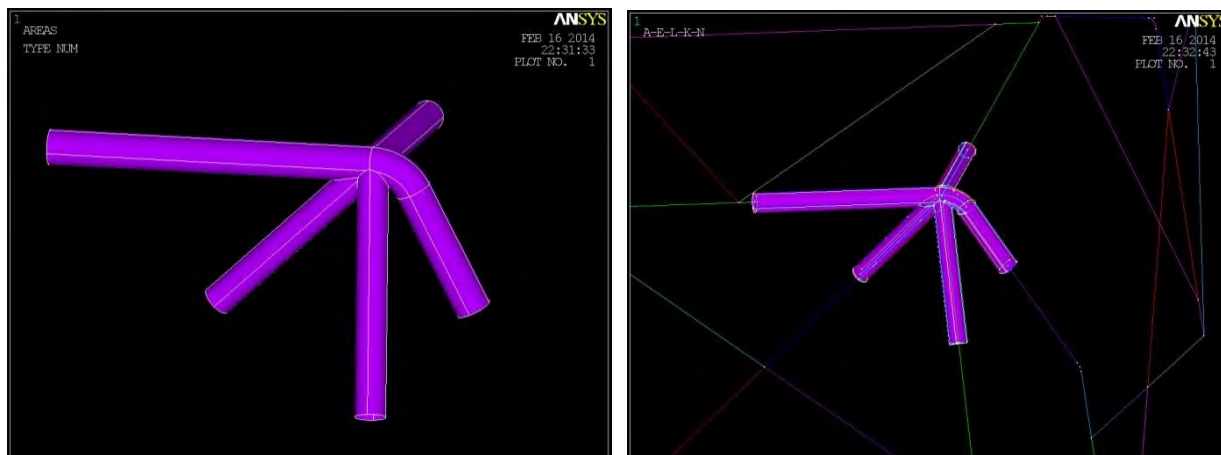


Ilustración 122 - Superficies de las barras de la unión 1

### 7.2.5 ANÁLISIS ENSAYO 2 (CARGA DISTRIBUIDA)

Para crear el análisis de la estructura con elementos tipo Shell con el ensayo 2 (carga distribuida) se siguen los mismos pasos que los acometidos para realizar el apartado “7.2.2 Análisis ensayo 1 (carga puntual)”, es decir:

- 1 Crear un Type 1 y un Type 3 para elementos tipo Beam que serán los mismos que se definieron en el apartado “7.1.2 Análisis ensayo 1 (carga puntual)” y un Type 2 para los nuevos elementos tipo Shell.
- 2 Definir las constantes reales de ambos tipos de elementos.
- 3 Asignar los dos tipos de elementos Beam a las barras y los elementos tipo Shell a las áreas.
- 4 Mallar cada tipo de elemento por separado.
- 5 Unir las líneas y áreas del modelo con elementos. Porque al ser figuras geométricas diferentes el programa supone que la estructura no es continua y al dar los resultados refleja en dichas zonas un salto de discontinuidad.
- 6 Introducir restricciones de desplazamientos en los anclajes del modelo.
- 7 Definir el valor de la carga y ubicarla en la zona correcta del modelo.

Las indicaciones y los datos que se introducen al modelo son los mismos que el apartado 7.2.2 menos el paso 7, en el cual, al tener una carga distribuida el valor y la ubicación de dicha fuerza cambian al igual que el valor del número de nodos para dividir la carga. Por lo tanto, sólo se explicará cómo introducir y ubicar la fuerza.

La fórmula para calcular el valor de la carga distribuida aparece dentro del capítulo “4. Tipos de ensayos” en el apartado “Ensayo 2: Carga vertical sobre arco principal”. El valor de dicha carga es:

$$q = 7,5(\text{daN}) * 10\left(\frac{\text{N}}{\text{daN}}\right) * (1035 + 150)$$

$$q = 88875 \text{ N}$$

Ahora hay que calcular que cantidad de nodos hay en la barra horizontal del arco principal para saber que fracción de fuerza tiene cada nodo. Hay que tener cuidado porque la barra en la que se aplica la fuerza se ha modelado una parte con elementos tipo Beam y otra parte con Shell. En primer lugar hay que saber qué porcentaje de longitud de barra tiene elementos Beam. Para ello se mide la longitud entera de la barra con la herramienta Preprocessor/ Modeling/ Check Geom/ KP distances y después se mide la porción de barra que posee elementos Beam. A continuación se calcula que tanto por cien de longitud total tiene cada parte.

$$Longitud_{total} = 815,5 \text{ mm}$$

$$Longitud_{Beam} = 440,7 \text{ mm}$$

Una vez que se tienen las medidas se calculan los tantos por ciento de cada parte. La barra total posee un 54% de elementos Beam y un 46% de elementos Shell. Y ahora se aplica cada tanto por cien al valor de la carga total para saber qué cantidad de carga soporta cada porción de barra.

$$Fuerza_{Beam} = 47992,5 \text{ N}$$

$$Fuerza_{Shell} = 40882,5 \text{ N}$$

La siguiente operación es calcular que cantidad de nodos poseen las líneas de elementos Beam. Para ello se seleccionan las líneas 94 y 99 que se observan en la ilustración 123 con la herramienta Select/ Entities; y después se seleccionan los nodos que pertenecen a dichas líneas.

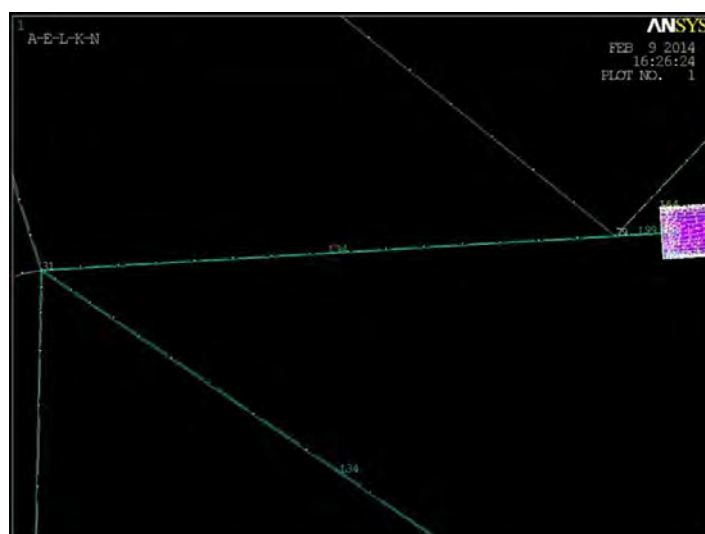


Ilustración 123 - Visualización de las líneas 94 y 99

En la pantalla aparecen los nodos referentes a esas líneas y se puede contar que hay 16 nodos, por lo tanto la fuerza que se aplica en cada nodo de las líneas que poseen elementos Beam es:

$$F_{Y \text{ por nodo Beam}} = \frac{47992,5 \text{ N}}{16 \text{ nodos}} = 2999,53 \text{ N/nodo}$$

Una vez que se sabe el valor de la fuerza se introduce en el programa como una carga  $F_y$  con sentido negativo. Para calcular los nodos que posee la línea con elementos tipo Shell se realizan las mismas operaciones, pero se selecciona como línea de aplicación de la carga la recta superior de las superficies que definen la barra, es decir, la línea 63 de la ilustración 124.



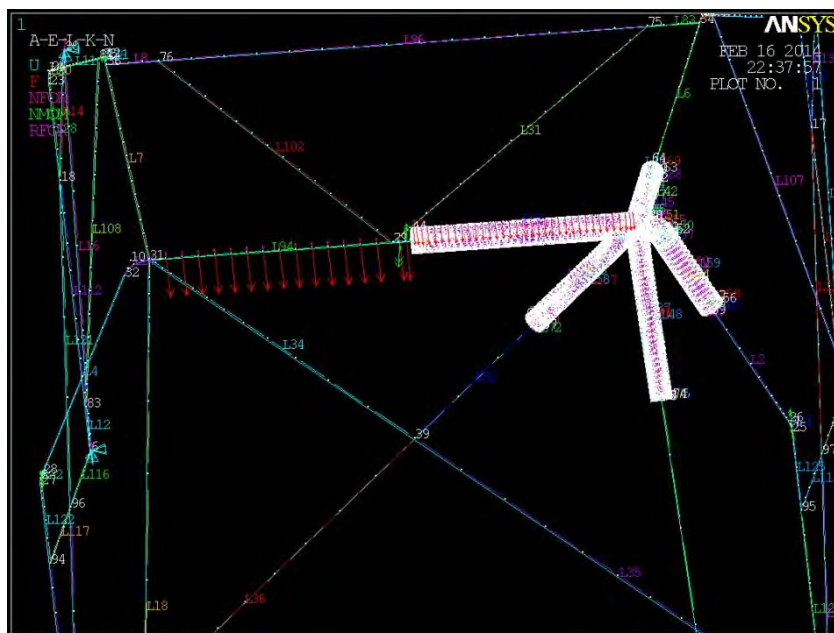
**Ilustración 124 - Visualización de la línea 63 de las superficies de la barra**

Sale como resultado que dicha línea tiene 35 nodos, por lo que la fuerza en cada nodo de la línea es la siguiente:

$$F_{Y \text{ por nodo Shell}} = \frac{40882,5 \text{ N}}{35 \text{ nodos}} = 1166,8 \text{ N/nodo}$$

Se introduce esta fuerza en dicha línea como una carga en dirección del eje "Y" y con sentido negativo. Por lo tanto, en la pantalla debería aparecer la estructura con las dos proporciones de la fuerza ubicadas en cada parte de la barra, ilustración 125.





**Ilustración 125 - Estructura con carga distribuida en Beam y Shell**

Ya se han realizado todos los pasos para definir el análisis, por lo que ahora sólo falta resolver y analizar los resultados del programa.

## 7.2.6 RESULTADOS ENSAYO 2 (CARGA DISTRIBUIDA)

En la ilustración 126 se visualizan los resultados de desplazamientos que arroja el programa para el modelo de elementos Shell con el ensayo 2 de carga distribuida. Se observa que la deformada es coherente con el planteamiento de cargas que se ha hecho, puesto que los mayores desplazamientos se concentran en la barra de aplicación de la carga. Según se aleja de dicha zona las tensiones del modelo van disminuyendo hasta los pies de anclajes.



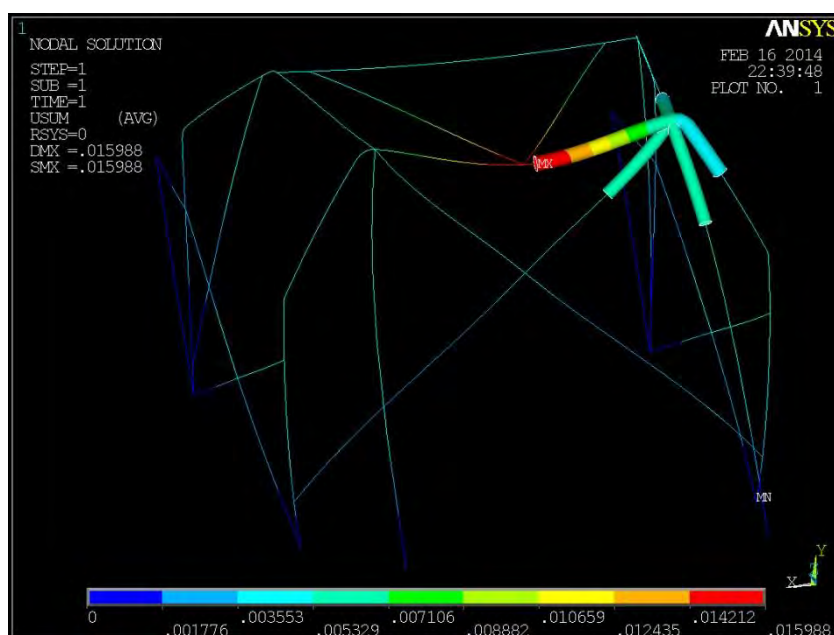


Ilustración 126 - Resultados de desplazamientos con carga distribuida (1)

El valor del desplazamiento máximo se sitúa en el centro de la barra horizontal del arco principal y tiene un valor de 15,988 milímetros, ilustración 127. Y el valor de mínimo desplazamiento se concentra en los pies de anclaje. El valor de desplazamiento máximo es menor que el impuesto por el anexo B con referencia [14] para este tipo de ensayo que es 50 milímetros, por lo tanto, la estructura es válida desde el punto de vista de desplazamientos.

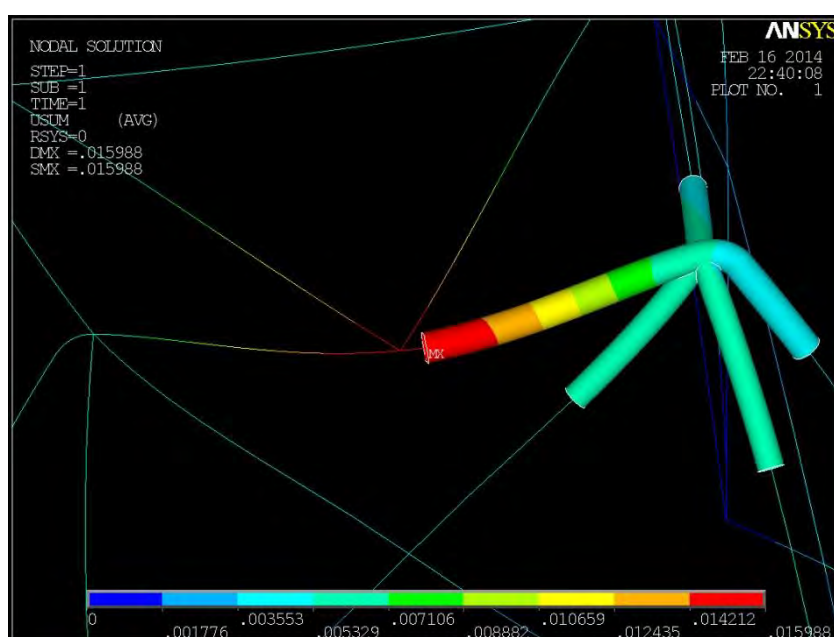
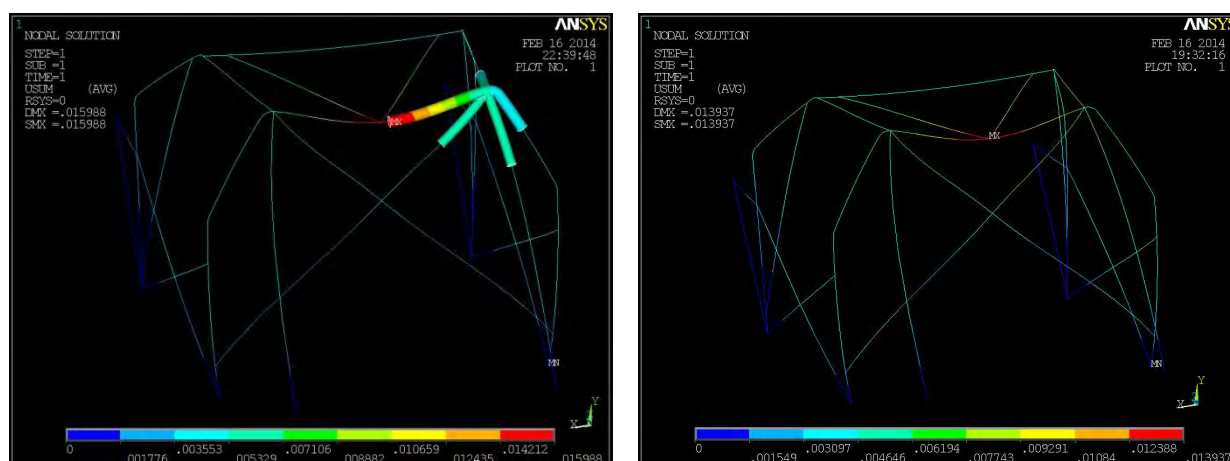


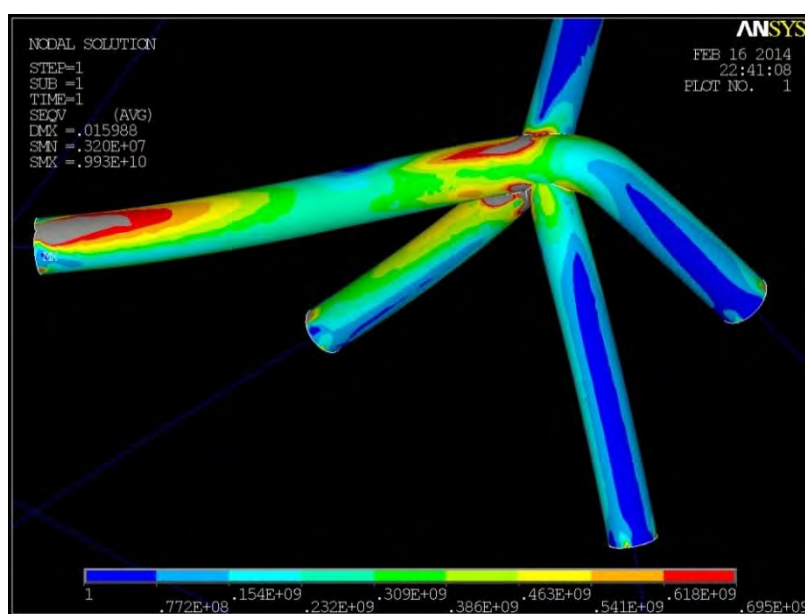
Ilustración 127 - Resultados de desplazamientos con carga distribuida (2)

Si este modelo se compara con el análisis de los resultados “7.1.5 Resultados ensayo 2 (carga distribuida)”, ilustración 136 derecha, se puede observar que ambas deformadas trabajan de forma idéntica teniendo las mismas franjas de desplazamientos en las mismas zonas de la estructura. Además, como el valor del desplazamiento máximo del ensayo de elementos Beam era 13,937 es muy parecido al de elementos Shell, por lo tanto, la unión se ha modelado correctamente, ilustración 128.



**Ilustración 128 - Resultados de deformación con carga distribuida con elementos Beam y Shell a la izquierda y con Beam sólo a la derecha**

Respecto al estado tensional, se observa en la ilustración 129 cómo la distribución de tensiones es homogénea y se comporta de forma normal respecto al planteamiento de ubicación de la carga, situándose las zonas con mayor tensión en la parte central de la barra y en las uniones de las barras.

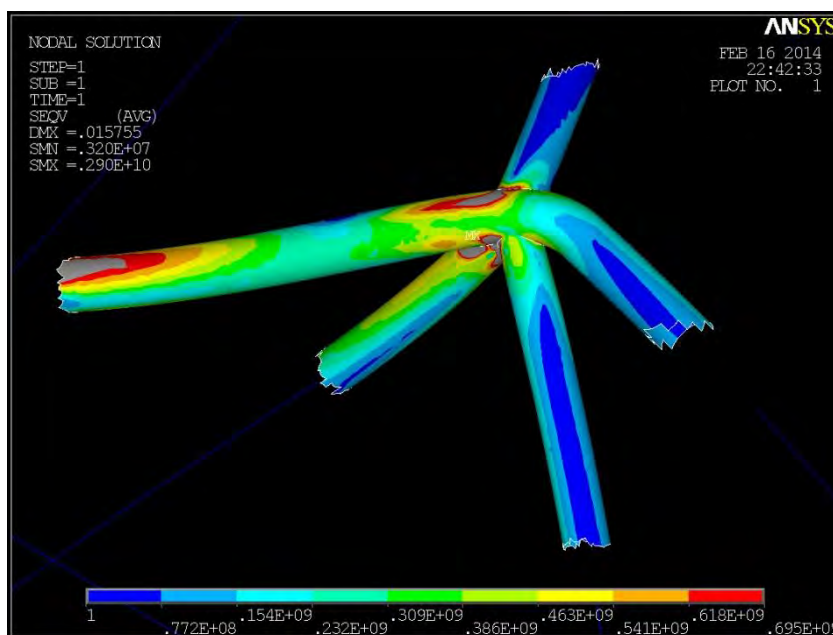


**Ilustración 129 - Resultados tensional con carga distribuida**



**Ilustración 130 - Localización de la tensión máxima**

Según el programa el valor de la tensión máxima es de 9930 Mpa y es muy superior al límite elástico del material 695 Mpa, incluso puede llegar al límite de rotura. Pero es lógico que sea un valor tan elevado puesto que se ubica en la zona de la barra donde se han introducido elementos para unir la línea mallada con elementos Beam y las áreas mallados con elementos Shell, ilustración 130. Como se explicó anteriormente en estas zonas los valores de la tensión son muy elevados debido a que son singularidades de tensión, por lo tanto, no son datos fiables para realizar un estudio del modelo. Para poderse fijar en datos correctos se realiza la operación que se llevó acabo en el capítulo 7.2.3. Esta acción consiste en deseleccionar los elementos más próximos a las uniones de elementos Beam y Shell y que el programa recalculé la tensión máxima del modelo.



**Ilustración 131 - Modelo sin elementos de unión Beam con Shell**

Como se observa en la ilustración 131 la tensión máxima ha disminuido considerablemente hasta el valor de 2900 MPa, situándose en la unión de todas las barras. Pero este valor todavía sigue siendo muy superior al límite elástico del material. Por un lado se puede pensar que este dato de la tensión es lógico puesto que se puede ubicar concretamente en la unión de soldadura de dos barras, pero por otro se visualiza en la imagen que son áreas muy grandes donde se ubican estas tensiones tan elevadas. Concretamente en la ilustración 131 se observa cómo incluso quitando los elementos de unión de elementos Beam y Shell, sigue habiendo una zona muy grande en la que se supera el límite elástico del material. Por lo tanto, se puede decir que este diseño del arco de seguridad no es válido puesto que hay muchas zonas en las que se supera holgadamente el límite elástico.

Antes de buscar soluciones para fortalecer la estructura es conveniente comparar este análisis con el del modelo de elementos tipo Beam descrito en el apartado “7.1.5 Resultado ensayo 2 (carga distribuida)”. Puesto que si no coinciden ambas distribuciones de tensiones y valores tensionales, puede ser que se haya modelizado mal la unión del capítulo 7.2.4.

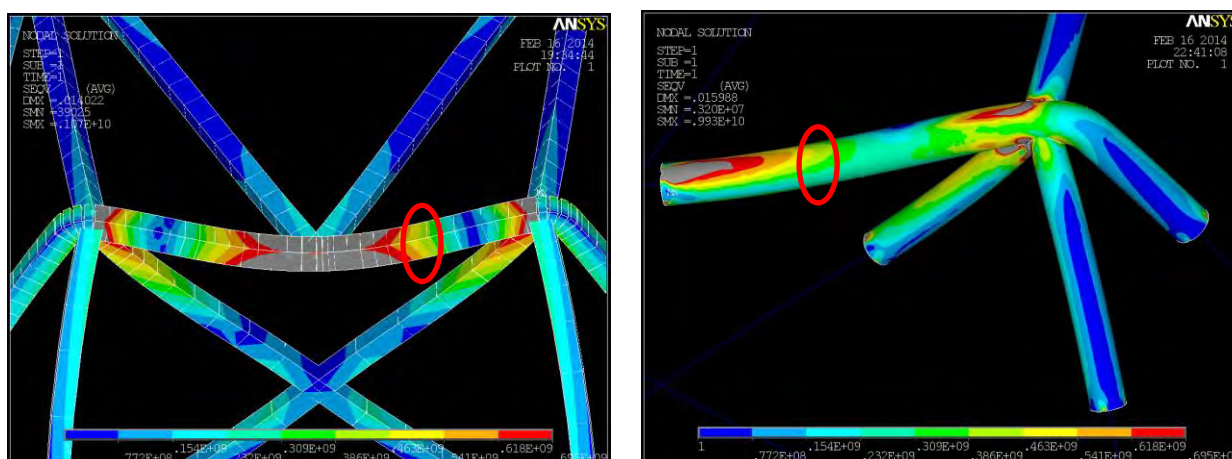


Ilustración 132 - Zona de selección de un nodo para comparar valores de tensión

Como se puede observar en la ilustración 132 ambas distribuciones de tensiones son muy parecidas. Tienen dos grandes zonas de color gris donde se supera el límite elástico del material, una zona en el centro de la barra y otra en la unión de las barras. Además ambos valores de tensión máxima superan bastante el límite elástico del material. Es mayor el valor máximo del modelo de elementos tipo Shell porque se localiza en la unión de los dos tipos de elementos. Como última comparación se va a coger un elemento que esté dentro de las áreas marcadas con un círculo rojo en la ilustración 132 y si ambos valores son parecidos se podrá asegurar que la unión está correctamente modelizada. El valor de la tensión en el elemento del

modelo de Beam es 451 MPa y del modelo Shell 329 MPa, por lo tanto, ambos valores se observa que son similares. Como todas las características que se han comparado en ambos modelos coinciden se puede finalizar que la unión que se estudia en este capítulo está bien modelizada.

Con el estudio que se ha realizado hay que rechazar esta estructura porque hay zonas donde se supera bastante el límite elástico del material, aunque desde el punto de vista de desplazamientos la estructura es aceptable respecto el anexo B con referencia bibliográfica [14]. Por lo cual, se tienen que buscar soluciones para fortalecer la estructura y disminuir el valor de la tensión máxima.

### 7.3 PROPUESTAS DE SOLUCIONES

Como la estructura que se ha propuesto se tiene que rechazar puesto que la tensión máxima supera el límite elástico del material, se deben buscar soluciones para disminuir dicho valor. Este dato de la tensión se puede hacer más pequeño fortaleciendo las barras de la estructura y para ello se proponen dos soluciones:

- 1 Aumentar el espesor de la barra donde se aplica la carga distribuida, puesto que en el ensayo 2 es donde la tensión máxima ha superado el límite elástico del material.
- 2 Introducir más barras opcionales en el modelo para fortalecer la zona de aplicación de la carga del ensayo 2.

Ambas propuestas tienen sus ventajas e inconvenientes. Aumentar el espesor es una buena solución desde el punto de vista económico porque solamente habría que pedir la misma barra pero con un espesor mayor al proveedor. Pero por la parte tensional, elegir esta solución, no es aconsejable porque no se refuerza a penas las uniones de la barra horizontal del arco principal con los semiarcos laterales. Por lo tanto, si se elige esta opción se podría solventar el problema de superar el límite elástico en la zona central de la barra, pero seguiría apareciendo el mismo problema en las uniones de los extremos.

La segunda opción resulta más cara al cliente porque se incluyen dos barras a la estructura y supondría asumir el coste del acero de estos componentes más su respectiva soldadura al conjunto de barras. Pero a simple vista reforzaría mucho la zona central de la barra y reduciría el valor de las tensiones en las uniones de los extremos.

Como no se sabe que opción va a resultar más efectiva se va a realizar el cálculo de tensiones de ambas. Se va a elaborar el modelo y el cálculo, comentando por último los resultados que proporcione el programa.



### 7.3.1 SOLUCIÓN 1 (AUMENTO DE ESPESOR)

Como primera opción que se propone para que la tensión máxima no sea mayor que el límite elástico del material y por lo tanto poder homologar la estructura de seguridad, es aumentar el espesor de la barra horizontal del arco principal. La estructura de los anteriores ensayos tenía un espesor de 4 milímetros en todas las barras, ahora la solución que se presenta en este capítulo es que dicha barra tenga un espesor de 6 milímetros mientras que el resto siga manteniendo el espesor de 4 milímetros. Para no variar el valor de 20,5 milímetros del radio medio de la barra que se quiere modificar del modelo del capítulo “7.2.4 Modelización ensayo 2 (carga distribuida)”, se propone que la barra tenga un radio exterior de 23,5 milímetros y de radio interior 17,5 milímetros. Otorgando estos valores se puede aprovechar el diseño del capítulo 7.2.4.

Para analizar esta solución sólo se va a realizar el ensayo 2 de carga distribuida por ser el conflictivo. Como la estructura se va a reforzar, si el ensayo 1 cumplía antes, ahora también debe de cumplir.

#### 7.3.1.1 MODELIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN 1 MEDIANTE EL ENSAYO 2

Se puede aprovechar el modelo que se fabricó en el capítulo 7.2.4 para analizar la solución que se ha propuesto. Esto se puede hacer porque se ha seguido manteniendo el valor de los radios medios de las áreas del modelo. Por lo tanto, la estructura se puede observar en la ilustración 133.



Ilustración 133 - Visualización de la estructura de la solución 1

### 7.3.1.2 ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN 1 MEDIANTE EL ENSAYO 2

Para realizar el análisis de la estructura con el refuerzo se siguen los mismos pasos que se definieron en el apartado “7.2.5 *Análisis ensayo 2 (carga distribuida)*”. Todos los pasos se realizan igual que en dicho apartado y con los mismos valores, menos los tres primeros pasos que se definen a continuación.

A la hora de definir el tipo de elementos hay que tener cuidado puesto que en este diseño hay tres tipos de elementos Beam y dos de Shell. Es decir, para todas las barras menos las que forman el arco principal tendrán un Type 1 con elementos Beam 4, la barra horizontal del arco principal tendrá un Type 4 con elementos Beam 4 y el resto de barras que forman el arco principal tendrán un Type 3 pero con diferentes características. Lo mismo pasa para las áreas, todas las áreas menos la que pertenece a dicha barra que se refuerza tendrán un tipo de elementos Shell 63 y para las superficies de esta barra se utilizarán elementos Shell 63 pero con propiedades diferentes. En resumen, en la ruta Preprocessor/ Modeling/ Element type se crean un Type 1 con Beam4, un Type 2 con Shell63, un Type 3 con Beam4, un Type 4 con Beam4 y un Type 5 con Shell63, como se muestra en la ilustración 134.

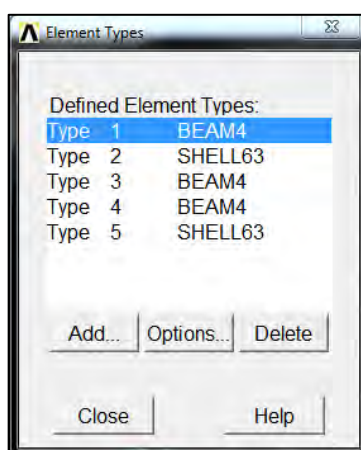


Ilustración 134 - Todos los elementos del modelo

En el paso 2 se deben introducir las características de cada uno de los cinco Types que se han definido en el paso anterior. Para los Type 1 y 3 se importan los mismos datos que en el apartado “7.1.2 *Análisis ensayo 1 (carga puntual)*”. Los datos que se meten en el Type 2 son los mismos que en el apartado “7.2.2 *Análisis ensayo 1 (carga puntual)*” para elementos Shell con radio medio 18 milímetros. En el Type 5 se calculan las características de estos elementos Beam. Como este Type se ha creado para la barra reforzada va a tener un radio exterior de 23,5 milímetros e interior de 17,5 milímetros.



- Área

$$\text{Área} = \pi * (R_{\text{ext}})^2 - \pi * (R_{\text{int}})^2$$

$$\text{Área} = \pi * (R_{\text{ext}}^2 - R_{\text{int}}^2)$$

$$\text{Área} = \pi * (0,0235^2 - 0,0185^2)$$

$$\text{Área} = 7,73 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

- Momento de inercia

$$I_z = I_y = \frac{\pi * R_{\text{ext}}^4}{4} - \frac{\pi * R_{\text{int}}^4}{4}$$

$$I_z = I_y = \frac{\pi}{4} * (R_{\text{ext}}^4 - R_{\text{int}}^4)$$

$$I_z = I_y = \frac{\pi}{4} * (0,0235^4 - 0,0185^4)$$

$$I_y = I_z = 1,66 * 10^{-7} \text{ m}^4$$

- Momento de inercia torsional

$$I_0 = I_z = \frac{\pi}{2} * (R_{\text{ext}}^4 - R_{\text{int}}^4)$$

$$I_0 = I_z = \frac{\pi}{2} * (0,0235^4 - 0,0185^4)$$

$$I_0 = I_z = 3,32 * 10^{-7} \text{ m}^4$$

En los apartados de “*Thickness along Z axis*” y “*Thickness along Z axis*” se introducen 0,047 que es el valor del diámetro exterior de la barra. En el Type 4 sólo se introduce el valor del espesor en los apartados “*Shell thickness at node I, J, K, L*”, es decir, 0,006 milímetros. En las ilustraciones 136 y 137 se pueden observar los datos introducidos en cada type.

Una vez que se han definido las características geométricas de todos los elementos, se tienen que asignar estos Types a cada una de las entidades geométricas del diseño al que corresponden. A todas las líneas de la estructura menos las dos que se indican en la ilustración 135 y el resto del arco principal se les asignan el Type 1 con Beam 4 y a las dos líneas que se muestran en dicha ilustración se les determina Type 4 con Beam 4. Al resto de barras del arco principal se asigna Type 3. Para las áreas de todo el diseño menos los que corresponden a la barra reforzada se asigna Type 2 Shell

63 y para las cuatro áreas de dicha barra que se muestra en la ilustración 146 se determina Type 5 Shell63.

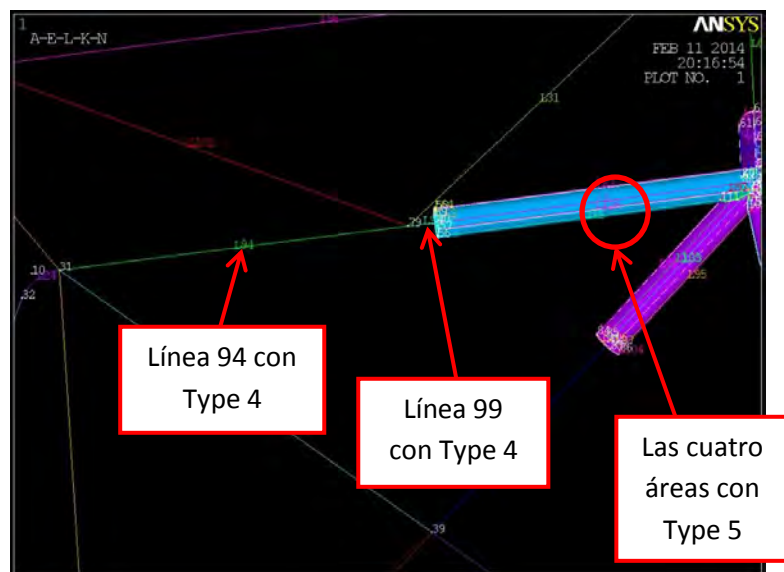


Ilustración 135 - Distribución de los diferentes Types en la barra horizontal

Real Constant Set Number 1, for BEAM4

Element Type Reference No. 1  
Real Constant Set No. 1

Cross-sectional area	AREA	0.0004524
Area moment of inertia	IZZ	7.42e-008
Area moment of inertia	IYY	7.42e-008
Thickness along Z axis	TKZ	0.04
Thickness along Y axis	TKY	0.04
Orientation about X axis	THETA	0
Initial strain	ISTRN	0
Torsional moment of inertia	DXX	1.484e-007
Shear deflection const Z	SHEARZ	0
Shear deflection const Y	SHEARY	0
Rotational frequency	SPIN	0
Added mass/unit length	ADDMAS	0

OK Apply Cancel Help

Real Constant Set Number 3, for BEAM4

Element Type Reference No. 3  
Real Constant Set No. 3

Cross-sectional area	AREA	0.0005152
Area moment of inertia	IZZ	1.093e-007
Area moment of inertia	IYY	1.093e-007
Thickness along Z axis	TKZ	0.045
Thickness along Y axis	TKY	0.045
Orientation about X axis	THETA	0
Initial strain	ISTRN	0
Torsional moment of inertia	DXX	2.186e-007
Shear deflection const Z	SHEARZ	0
Shear deflection const Y	SHEARY	0
Rotational frequency	SPIN	0
Added mass/unit length	ADDMAS	0

OK Apply Cancel Help

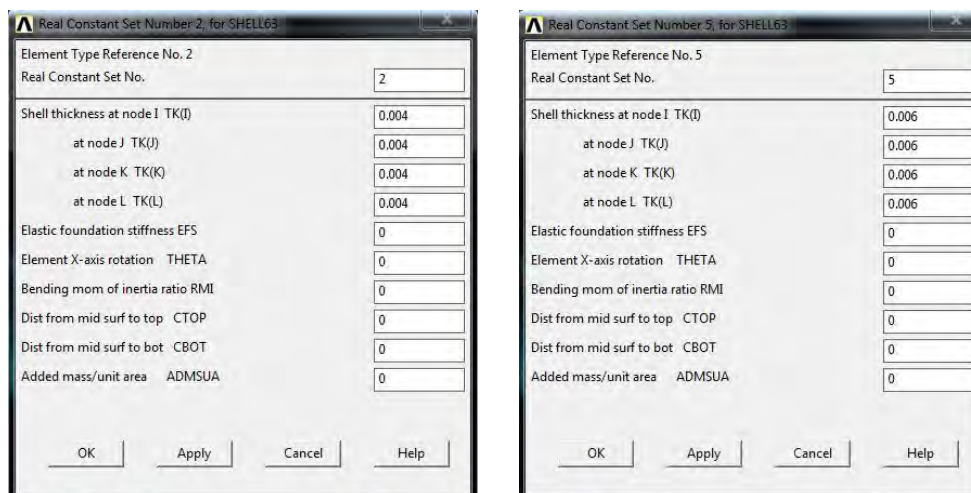
Real Constant Set Number 4, for BEAM4

Element Type Reference No. 4  
Real Constant Set No. 4

Cross-sectional area	AREA	0.000773
Area moment of inertia	IZZ	1.66e-007
Area moment of inertia	IYY	1.66e-007
Thickness along Z axis	TKZ	0.047
Thickness along Y axis	TKY	0.047
Orientation about X axis	THETA	0
Initial strain	ISTRN	0
Torsional moment of inertia	DXX	3.32e-007
Shear deflection const Z	SHEARZ	0
Shear deflection const Y	SHEARY	0
Rotational frequency	SPIN	0
Added mass/unit length	ADDMAS	0

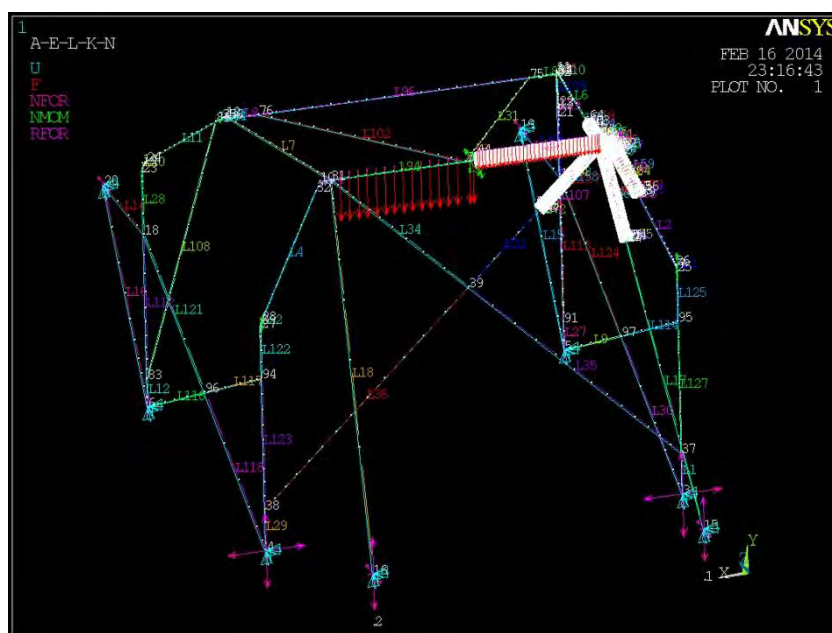
OK Apply Cancel Help

Ilustración 136 - Valores para definir los elementos Beam



**Ilustración 137 - Valores para definir los elementos Shell**

Una vez que se han realizado estos tres pasos iniciales, el resto de indicaciones y valores son los mismo que en el apartado “7.2.5 *Análisis ensayo 2 (carga distribuida)*”, incluido el valor y la situación de la carga distribuida. En la ilustración 138 se observa el análisis que se va a realizar al modelo de la estructura con el refuerzo de la solución 1.

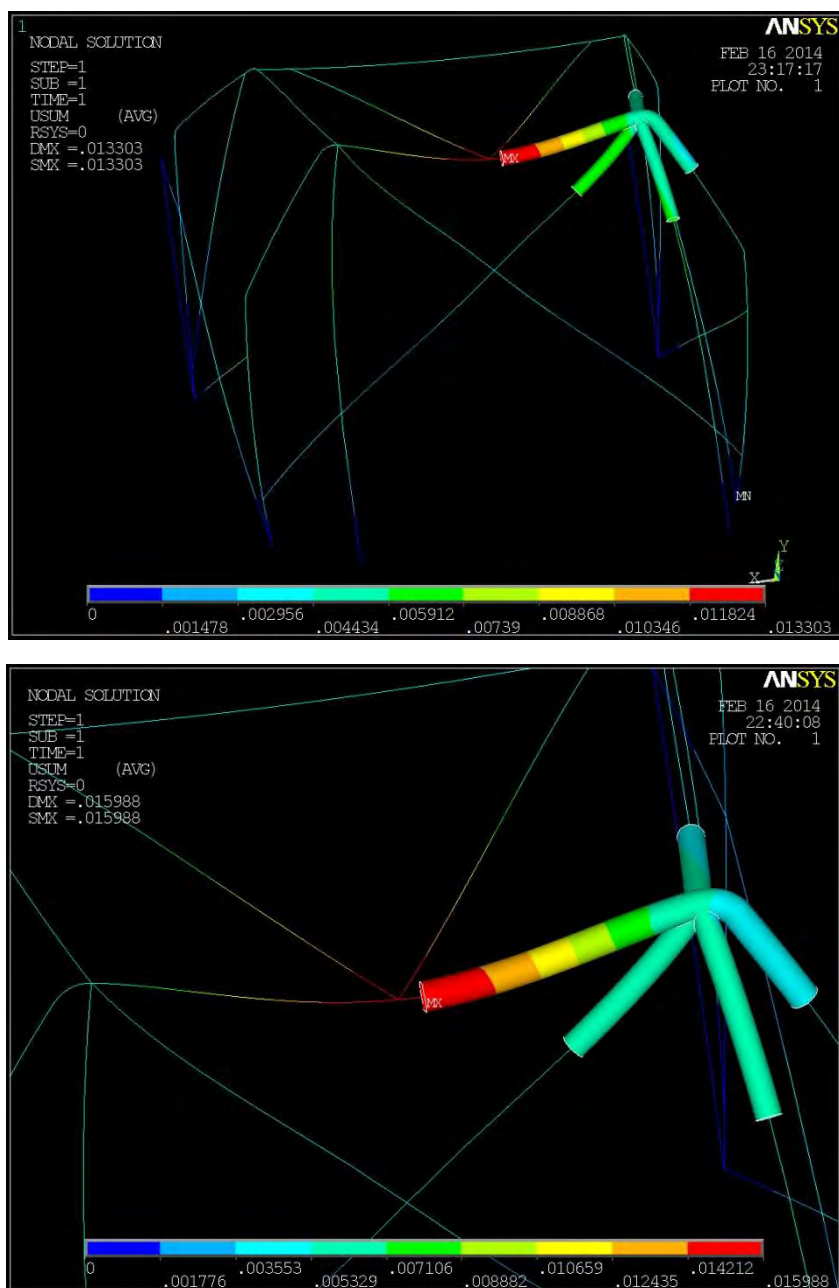


**Ilustración 138 - Estructura con carga distribuida en Beam y Shell**

### 7.3.1.3 RESULTADOS DE LASOLUCIÓN 1 MEDIANTE ENSAYO 2

Como se puede observar en la imagen superior de la ilustración 139 la deformada de este modelo se comporta de forma normal, al tener el valor máximo de

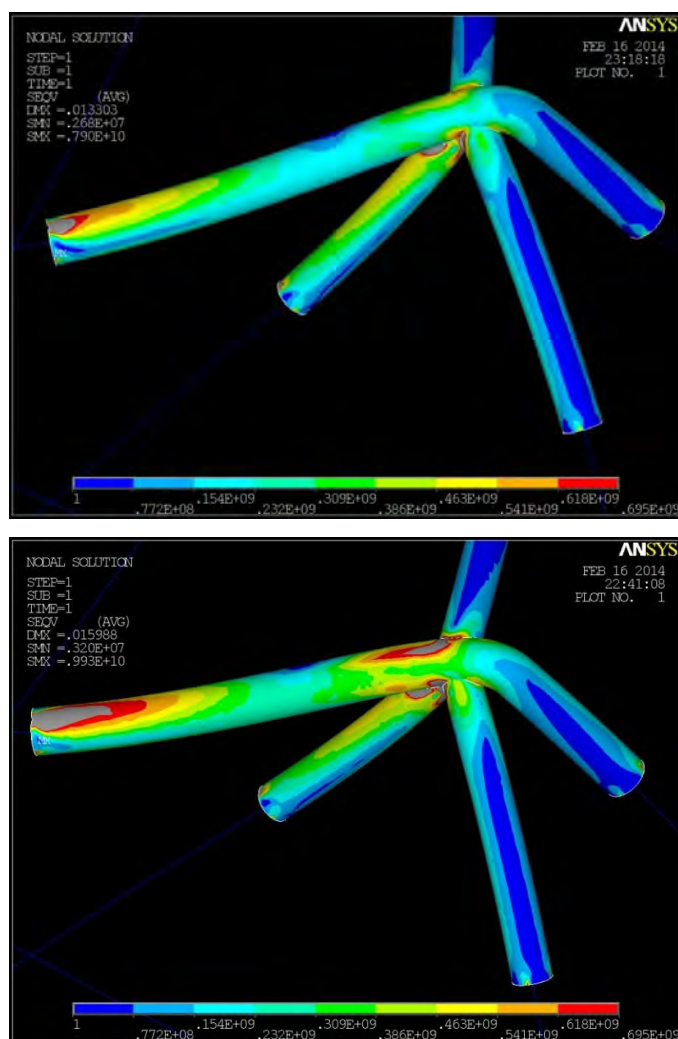
desplazamiento en el centro de la barra reforzada y disminuyendo este valor hasta la unión de las barras donde el desplazamiento es casi nulo. El valor máximo de desplazamiento es de 13,303 milímetros en dirección “Y”. Al comparar los resultados con los obtenidos en el capítulo “7.2.6 Resultados ensayo 2 (carga distribuida)”, imagen inferior de la ilustración 139, se observa que la deformada es muy parecida y el valor del máximo desplazamiento ha disminuido un poco debido al refuerzo que se ha incorporado en la estructura.



**Ilustración 139 - Resultados de desplazamientos con carga puntual con elementos Beam y Shell (solución 1) arriba y con elementos beam sólo abajo**

Desde el punto de vista de desplazamientos la estructura sería apta de acuerdo a las restricciones del ensayo 2 del apartado “4. Tipos de ensayo”, al ser el valor del desplazamiento máximo menor de 50 milímetros.

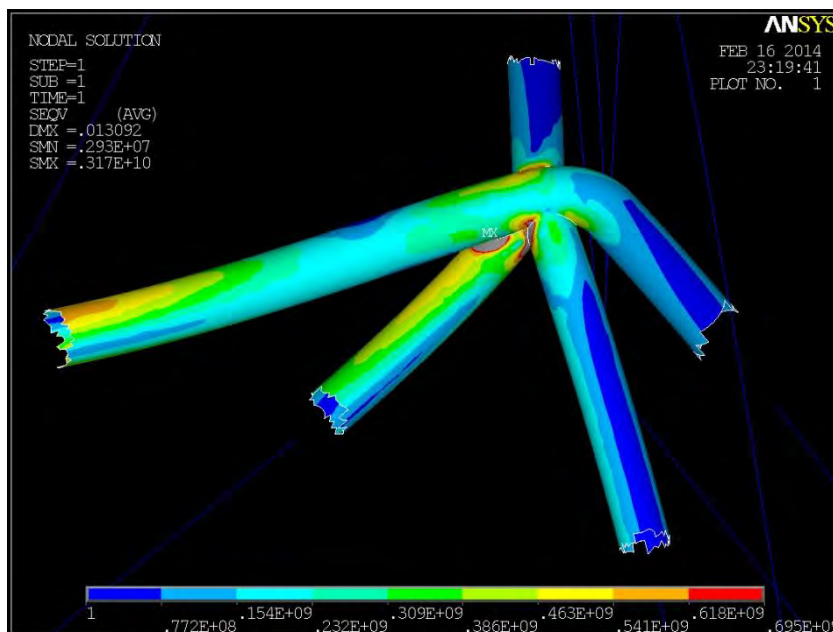
Como se observa en la imagen superior de la ilustración 140 la distribución de tensiones de este modelo sigue teniendo dos zonas grises donde se supera el límite elástico del material, aunque comparándolo con los resultados del diseño anterior, imagen inferior de la ilustración 140, han disminuido considerablemente. Estas zonas son la parte central de la barra reforzada y la unión de las demás barras que modelizan la soldadura, que coinciden con las áreas críticas donde se superaba la máxima tensión que soporta el material antes de plastificar. El valor de la máxima tensión es 7900 Mpa y se sitúa en la unión de elementos Beam y Shell. Para ver los resultados reales, puesto que en estas zonas se producen singularidades de tensiones, se va a quitar dichos elementos del modelo de resultado y ver qué nuevo valor para la tensión proporciona el programa.



**Ilustración 140 - Resultados de deformación de la solución 1 arriba y sin aumento de espesor de la barra horizontal abajo**



Una vez que se han deseleccionado los elementos de las uniones críticas, ilustración 141; se observa que el nuevo valor de la tensión máxima es 3170 Mpa y ahora se localiza en la unión del extremo derecho de la barra que se refuerza. Aunque está en una zona de soldadura de barra y en dichas franjas la tensión siempre suele ser mayor a la real, todavía es mucho mayor que el límite elástico del material. Por lo tanto se concluye que la solución 1 no puede ser homologada por el anexo B de la referencia bibliográfica [14], aunque la restricción de que la máxima deformación de la estructura no supere 50 milímetros sí se cumpla.

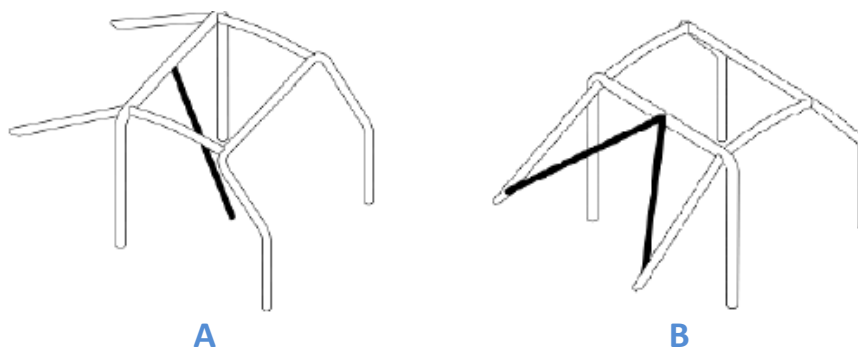


**Ilustración 141 - Modelo sin elementos de unión Beam con Shell**

Como está solución 1 no es la idónea para el objetivo del proyecto se van a realizar los cálculos para obtener los resultados de la solución 2 que se propuso en el capítulo “7.3 Propuestas de soluciones”.

### 7.3.2 SOLUCIÓN 2 (INCORPORACIÓN DE BARRAS OPCIONALES)

En esta solución se opta por incluir barras opcionales en el modelo de la estructura para fortalecer la zona donde se supera el límite elástico. Para saber en qué zonas está permitido incluir barras en el diseño se consulta el anexo A referente a la referencia bibliográfica [16]. En el apartado “8.3.2.2.6 Refuerzos de ángulo y unión” de dicho anexo se observan varias configuraciones de barras para reforzar diferentes zonas del arco de seguridad. De las cuales, las que más se ajustan al propósito que se persigue en este capítulo son las opciones A y B de la ilustración 142.



**Ilustración 142 - Opciones de barras para la solución 2**

Ambas soluciones son óptimas para que disminuya el valor de la tensión máxima puesto que reforzarían la zona de aplicación de la carga distribuida. Pero se opta por la disposición de barras de la opción B de la ilustración 142 porque al tener dos miembros de refuerzo se estaría del lado de la seguridad. Para posicionar los componentes, dicho anexo sólo restringe que los extremos de las barras de refuerzo no deben situarse a más distancia de la mitad de la longitud del miembro al que van unidos. Por lo tanto, los extremos inferiores de estos refuerzos se van a ubicar a 50 milímetros del pie de anclaje y la unión de los extremos superiores se va a separar, soldando las barras refuerzo a la barra horizontal del arco principal por separado y cada una a 80 milímetros de la mitad de la longitud de dicha barra.

### **7.3.2.1 MODELIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN 2**

Para incluir las dos barras de refuerzo en la estructura se van a seguir pasos parecidos a los que se explicaron en la elaboración de modelos anteriores, como por ejemplo, el del apartado “7.1.1 Modelización”. Primero se diseñan en el programa las dos barras, teniendo en cuenta la distancia de los extremos inferiores a los pies de anclaje de los tirantes traseros y la separación de los extremos superiores con la mitad de la barra horizontal del arco principal. A continuación, se dividen los tirantes traseros por la intersección de dichos tirantes con las barras refuerzo y también se realiza la misma operación en la intersección de la barra de aplicación de la fuerza con los extremos superiores de los miembros introducidos. Una vez realizadas estas indicaciones todos los componentes de la estructura quedan correctamente unidos, ilustración 143.



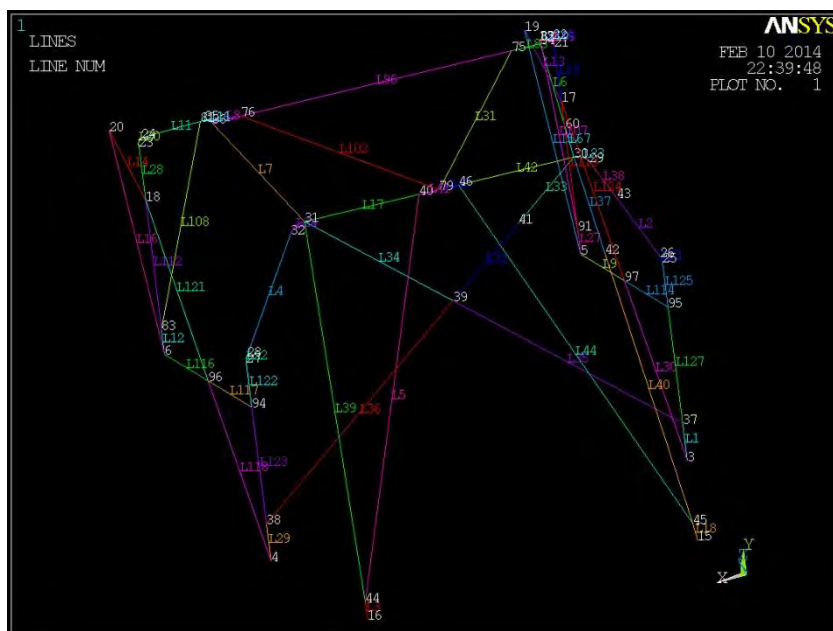


Ilustración 143 - Estructura con los refuerzos de la solución 2

Ahora mismo la estructura estaría lista para realizar un estudio con elementos Beam, pero como lo que se quiere obtener con este nuevo modelo es el valor de la tensión máxima en las uniones de los extremos de la barra y en la nueva unión del centro, se debe realizar el análisis con elementos Shell. Por lo tanto, se deben incluir en el modelo las superficies de las barras en las uniones central y derecha. Para dibujar estas áreas en el diseño se siguen los pasos descritos en el apartado “7.2.1 Modelización ensayo 1 (carga puntual)” puesto que en ambos párrafos se deben modelizar superficies. Como también interesan los resultados en la unión de la barra horizontal del arco principal con el semiarco lateral derecho, se aprovecha el diseño del apartado 7.2.1 y se sobrescribe en esta estructura para modelizar las áreas de la unión central de la barra, ilustración 144. En esta unión todas las barras deben tener un radio medio diferente para que el programa no rechace el modelo. Por lo tanto, como la barra 1 tenía un radio medio de 20,5 milímetros y la barra 2 de 18 milímetros, ahora se otorga a la barra 3 un radio medio de 17,9 milímetros, a la barra 4 de 17,8 milímetros y a la barra 5 de 17,7 milímetros. Después de realizar todas las operaciones para definir y ensamblar las áreas, la estructura final de este capítulo se puede observar en la ilustración 145.

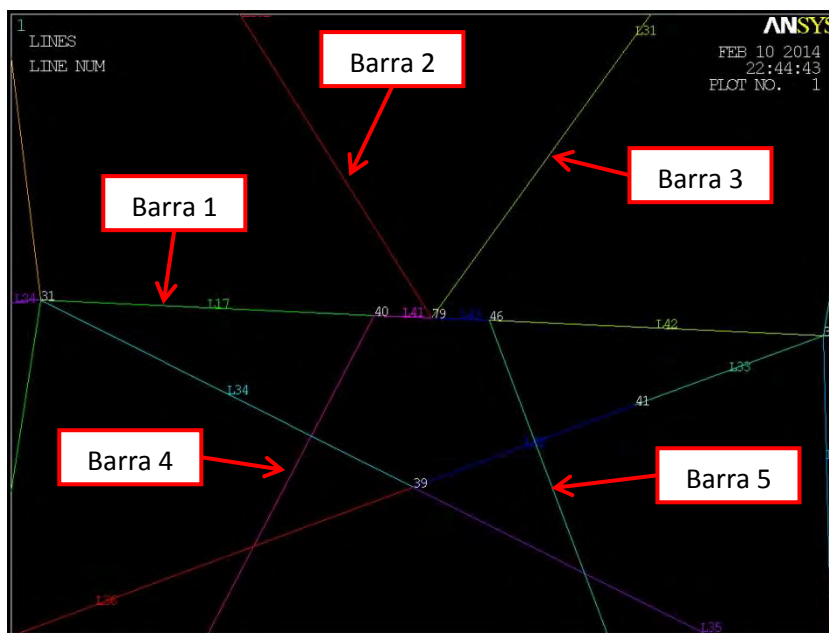


Ilustración 144 - Unión que se modeliza en la solución 2

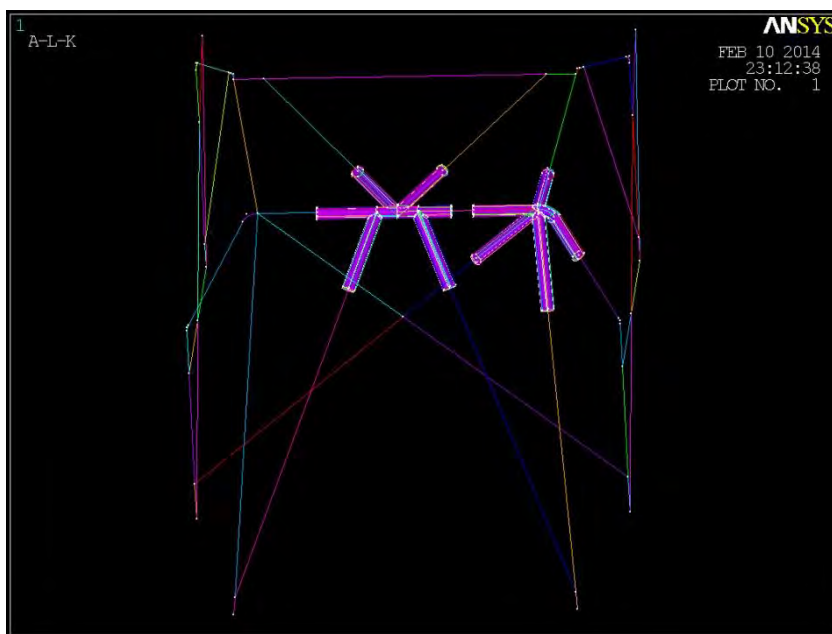


Ilustración 145 - Estructura con las superficies de las dos uniones traseras

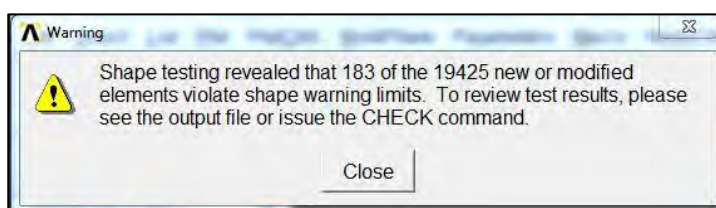
### 7.3.2.2 ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN 2 MEDIANTE EL ENSAYO 2

Para realizar el ensayo 2 en la nueva estructura con los refuerzos se deben seguir los mismos pasos del capítulo “7.2.2 Análisis ensayo 1 (carga puntual)”:

- 1 Crear un Type 1 y un Type 3 para elementos tipo Beam (serán los mismos que se definieron en el apartado “7.1.2. Análisis ensayo 1 (carga puntual)” y un Type 2 para los nuevos elementos tipo Shell.

- 2 Definir las constantes reales de ambos tipos de elementos.
- 3 Asignar elementos tipo Beam (Type 1) a las barras que no pertenecen al arco principal, el otro tipo Beam (Type 3) a las líneas pertenecientes al arco principal y los elementos tipo Shell a las áreas.
- 4 Mallar cada tipo de elemento por separado.
- 5 Unir las líneas y áreas del modelo con elementos. Porque al ser figuras geométricas diferentes el programa supone que la estructura no es continua y al dar los resultados refleja en dichas zonas un salto de discontinuidad.
- 6 Introducir restricciones de desplazamientos en los anclajes del modelo.
- 7 Definir el valor de la carga y ubicarla en la zona correcta del modelo.

A la hora de asignar el Type 2 de elementos Shell a cada superficie también hay que incluir las áreas de las barras de la unión central de la barra. Se deben mallar las superficies de las dos uniones que tiene el modelo y cuando el programa termine de mallar aparecerá en pantalla el “warning” de la ilustración 146. El cual indica que 183 elementos de la malla de los 19425 totales violan el test de forma de elementos, pero no se debe tener en cuenta puesto que es un porcentaje muy bajo 0,94%.



**Ilustración 146 - Aviso al mallar las áreas**

Para definir el valor de la carga hay que tener cuidado porque se debe calcular qué fracción de la fuerza se lleva cada parte de elementos Beam y Shell. Para ello se calcula qué tanto por ciento de longitud de línea corresponde a elementos Beam, que tanto por ciento del valor de la fuerza corresponde a este tipo de elemento, se cuenta el número de nodos que tienen las líneas con Beam, se divide el porcentaje de la carga entre el número de nodos y por último en cada nodo se ubica el resultado de la división con dirección “Y” negativa. Con las superficies de elementos Shell se opera de la misma forma. En la ilustración 147 se observa el análisis de la estructura que va a calcular el programa.

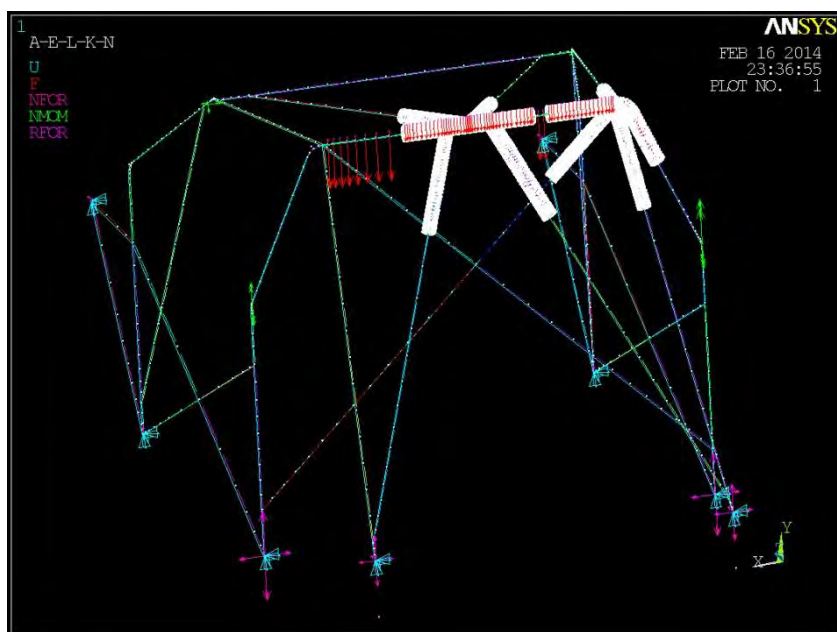


Ilustración 147 - Estructura de la solución 2 con carga distribuida

### 7.3.2.3 RESULTADOS DE LA SOLUCIÓN 2 MEDIANTE ENSAYO 2

La ilustración 148 corresponde con la solución respecto a desplazamientos que ha arrojado el programa del modelo de la estructura con las dos barras de refuerzo y la ilustración 149 la solución de la estructura sin reforzar del apartado “7.2.6 Resultados ensayo 2 (carga distribuida)”.

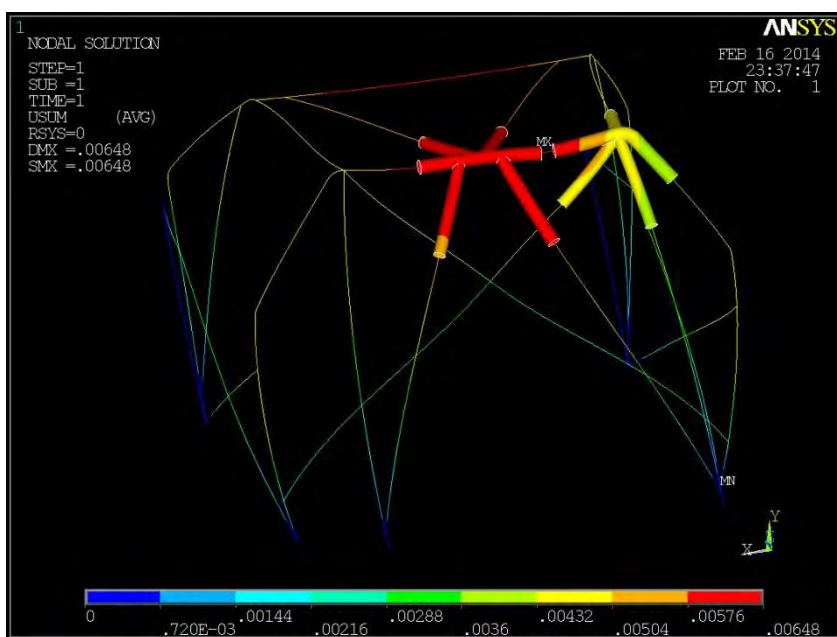
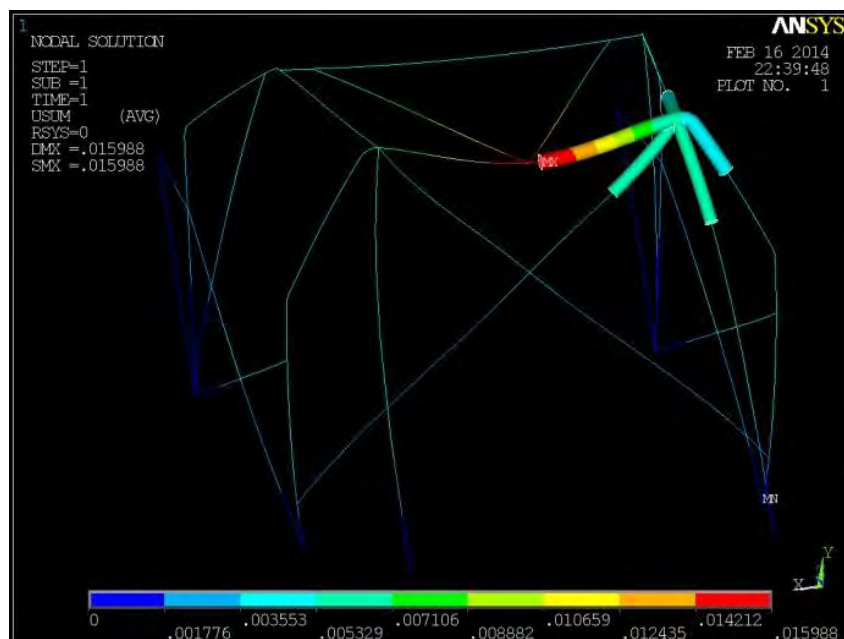


Ilustración 148 - Resultados de desplazamientos de la solución 2



**Ilustración 149 - Resultados de desplazamientos de la estructura con carga distribuida con Beam y Shell**

Como se puede observar en ambas figuras la deformada es diferente, pero esto es normal puesto que se han incluido dos miembros de refuerzo. En la zona de unión de los extremos superiores de los refuerzos con la barra de aplicación de la fuerza, el desplazamiento alcanza valores muy elevados, hasta llegar a 6,48 milímetros como valor máximo. Como era obvio el nuevo resultado de desplazamiento máximo es mucho menor que el obtenido en la estructura sin refuerzos, esto se debe a que las barras que se han incluido restringen el desplazamiento de la parte central de la barra horizontal. Por lo tanto, ahora los nuevos valores de desplazamiento máximo se sitúan en la zona intermedia entre la unión central y la del extremo derecho.

Respecto la distribución de tensiones de Von Mises se observa en la imagen superior de la ilustración 151, como el valor de la tensión máxima de la nueva estructura es 2800 Mpa. Este dato del resultado tensional ha disminuido bastante respecto el análisis de la estructura anterior, el cual era 9930 Mpa. El nuevo valor de tensión máxima se sitúa en una zona de unión de elementos Beam con Shell como se muestra en la ilustración 150, por lo que teniendo en cuenta que en estas áreas la tensión no se debe tener en cuenta al ser singularidades de tensión, seguro que todavía es menor. Para saber con más precisión el valor de la tensión máxima se va a deseleccionar los elementos que pertenecen a las uniones de Beam y Shell.



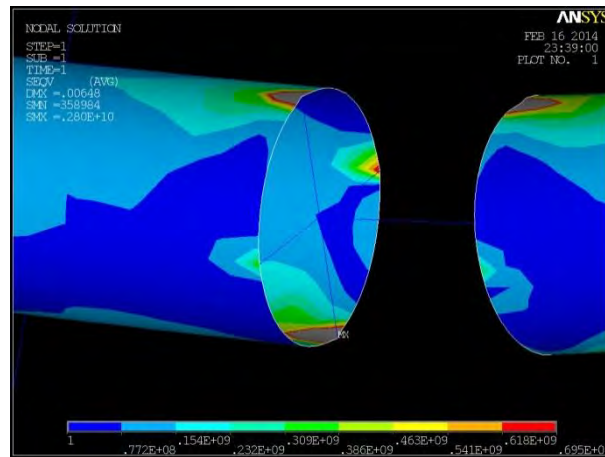


Ilustración 150 - Situación de la tensión máxima

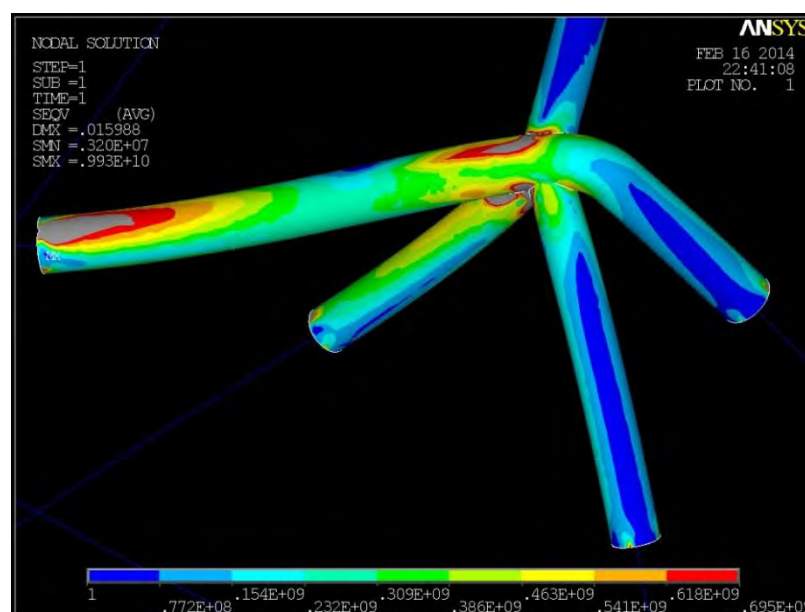
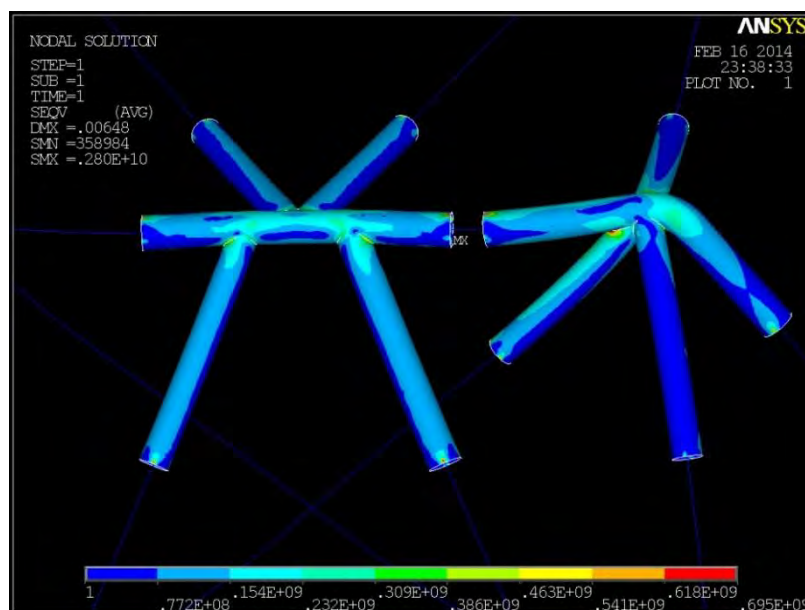
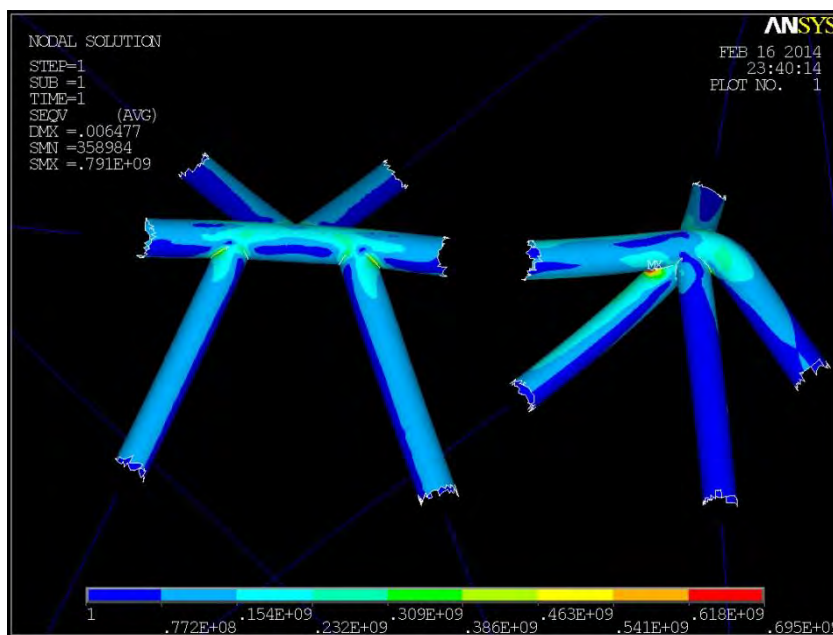


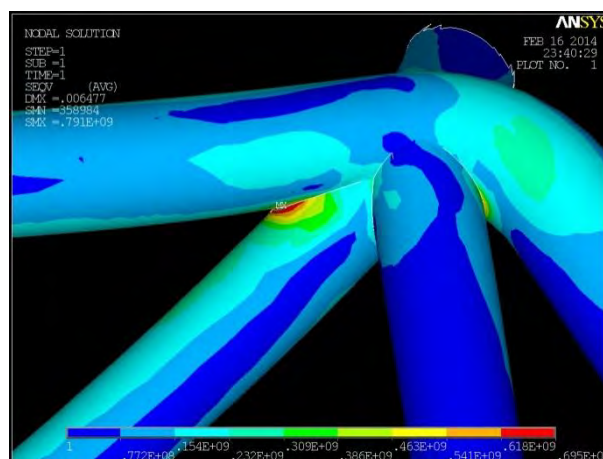
Ilustración 151 - Resultados de deformación de la solución 2 arriba y sin los refuerzos abajo



Una vez que se ha realizado la operación de deseleccionar los elementos críticos, ilustración 152, el programa refleja que el valor de la tensión máxima es 791 MPa. Esta tensión máxima supera por muy poco el valor del límite elástico del material, pero no es relevante porque se localiza en una soldadura de la unión derecha, ilustración 153. En las zonas de soldadura no se puede dar por buenos los valores de tensión puesto que no se están modelizando al no ser uno de los objetivos de este proyecto.



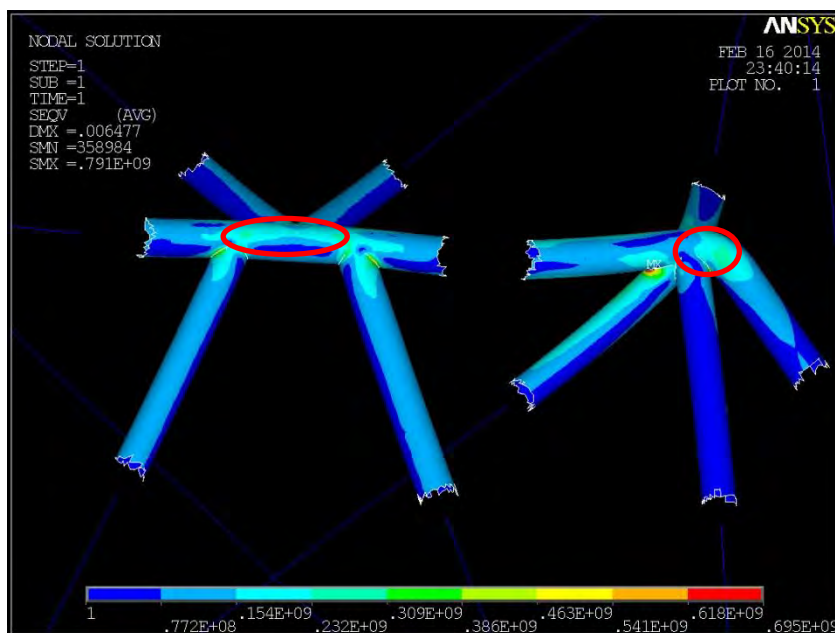
**Ilustración 152 - Modelo sin elementos de unión Beam con Shell**



**Ilustración 153 - Nueva situación de la tensión máxima**

De todas formas para estar seguros que el valor de la tensión máxima no supera el límite elástico del material de 695 MPa, se va a pedir al programa que arroje el resultado de la tensión en dos puntos de las dos uniones del modelo. Estos puntos

se localizan dentro de las dos áreas delimitados por un círculo rojo en la ilustración 154.



**Ilustración 154 - Zona de selección de un nodo para comprar valores de tensión**

El valor de la tensión en el elemento de la unión central es de 256 Mpa y el de la unión de la derecha 449 Mpa. Por lo tanto, se puede concluir que en el análisis de la estructura con los dos refuerzos no se supera el límite elástico del material.

Como se puede leer en los comentarios de los resultados de este apartado la estructura cumple todas las restricciones respecto el ensayo 2 del anexo B de la referencia bibliográfica [14]. Pero todavía falta ver que este diseño de la estructura cumple las limitaciones que impone el ensayo 1 de la misma referencia bibliográfica. En un principio sí debería cumplir el ensayo 1 porque la estructura sin reforzar ya superaba estas limitaciones, pero de todos modos, es aconsejable verificar este hecho con el arco de seguridad reforzado.

#### **7.3.2.4 MODELIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN 2 MEDIANTE EL ENSAYO 1**

Para realizar el modelo de la estructura reforzada incluyendo las áreas de las barras de la unión delantera se aprovecha el modelo que se realizó en el apartado “7.2.1 Modelización ensayo 1 (carga puntual)”. Por lo tanto se abre el archivo correspondiente a dicho modelo y se incluyen las dos barras que refuerzan el arco

principal de la estructura completa. Los pasos para incluir barras se han explicado en secciones anteriores. El modelo de este apartado se observa en la ilustración 155.

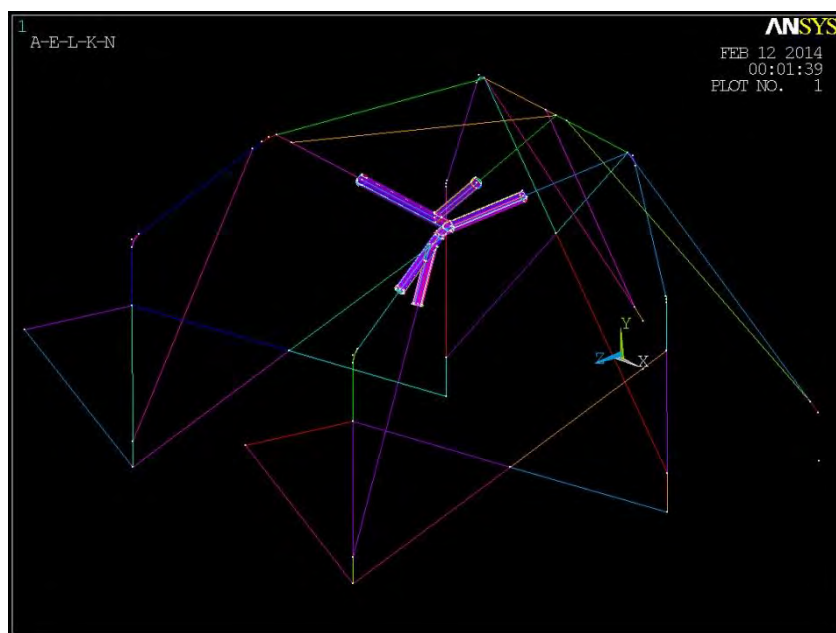


Ilustración 155 - Estructura con áreas de la unión 1 solución 2

### 7.3.2.5 ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN 2 MEDIANTE EL ENSAYO 1

Para realizar el análisis referente al modelo descrito anteriormente se siguen los mismos pasos que en el apartado “7.2.2 *Análisis ensayo 1 (carga puntual)*”, los cuales son:

- 1 Crear un Type 1 y un Type 3 para elementos tipo Beam que serán los mismos que se definieron en el apartado “7.1.2. *Análisis ensayo 1 (carga puntual)*” y un Type 2 para los nuevos elementos tipo Shell.
- 2 Definir las constantes reales de ambos tipos de elementos.
- 3 Asignar elementos tipo Beam (Type 1) a las barras que no pertenecen al arco principal, el otro tipo Beam (Type 3) a las líneas pertenecientes al arco principal y los elementos tipo Shell a las áreas.
- 4 Mallar cada tipo de elemento por separado.
- 5 Unir las líneas y áreas del modelo con elementos. Porque al ser figuras geométricas diferentes el programa supone que la estructura no es continua y al dar los resultados refleja en dichas zonas un salto de discontinuidad.
- 6 Introducir restricciones de desplazamientos en los anclajes del modelo.
- 7 Definir el valor de la carga y ubicarla en la zona correcta del modelo.

Además de seguir estos pasos, se utilizan los mismos datos empleados en este apartado 7.2.2. Por lo tanto, llevando a cabo todas estas indicaciones se reflejará en el programa el siguiente modelo final para analizar, ilustración 156.

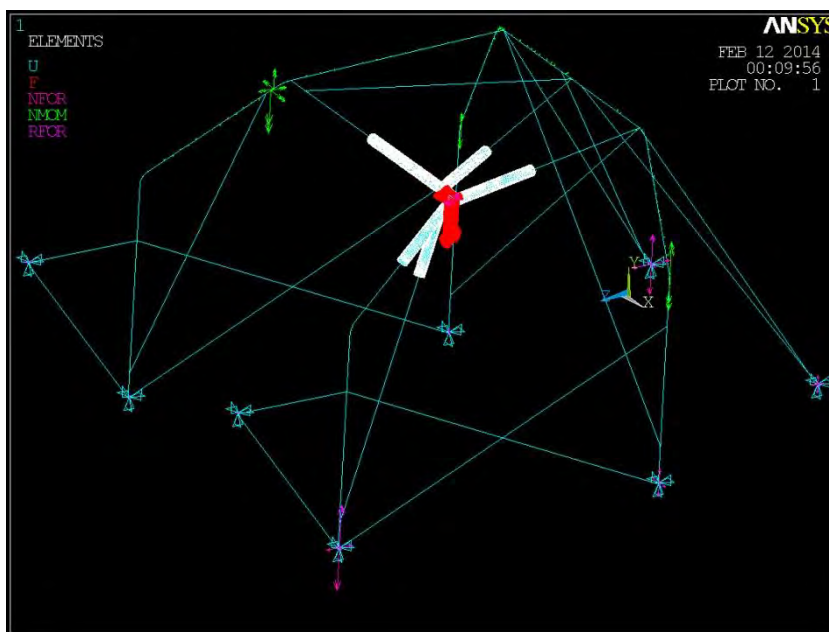
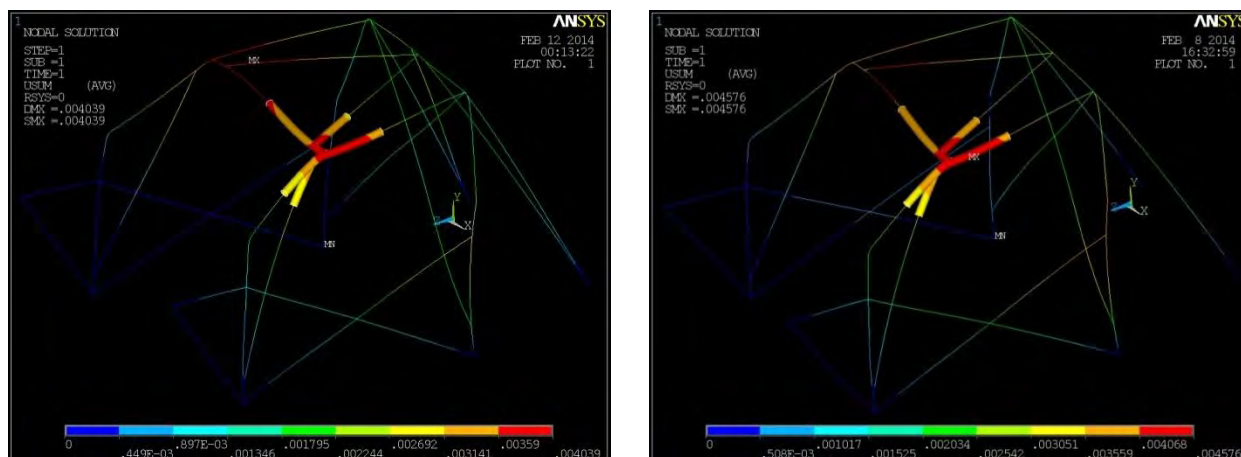


Ilustración 156 - Estructura mallada unión 1 solución 2

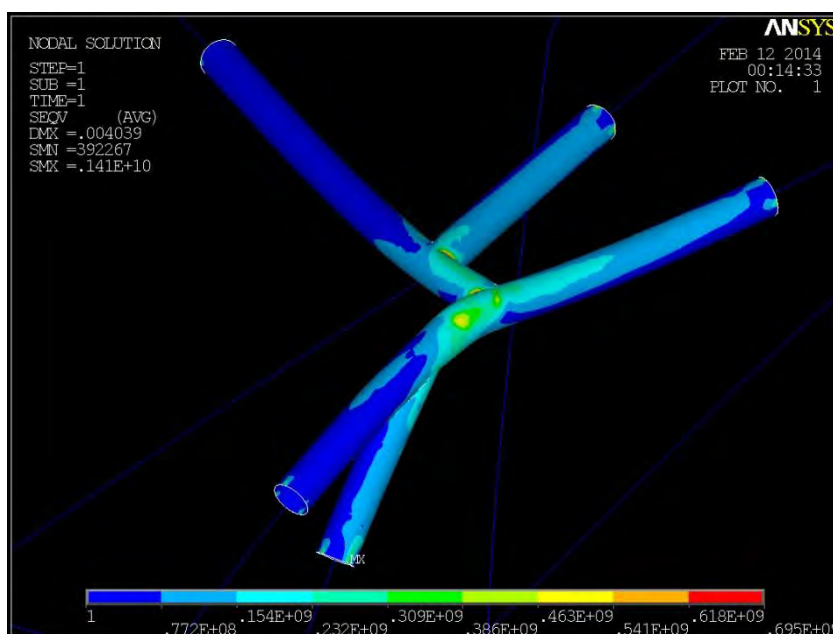
### 7.3.2.6 RESULTADOS DE LA SOLUCIÓN 2 MEDIANTE ENSAYO 1

De los resultados de desplazamientos se puede observar que la distribución de colores que definen las diferentes cantidades de desplazamientos se comporta de forma normal, imagen izquierda de la ilustración 157. El desplazamiento máximo es 4,039 milímetros, si se compara con el valor homólogo del apartado “7.2.3 Resultados ensayo 1 (carga puntual)” es muy parecido 4,576, imagen derecha de la ilustración 157. En ambas ilustraciones se observa que los cambios de valores de desplazamientos son muy parecidos, centrándose los máximos desplazamientos en la unión de aplicación de la carga puntual y en la misma unión del semiarco lateral derecho. Como se puede observar, que se hayan incluido los dos refuerzos en este diseño no tiene gran trascendencia para los resultados del ensayo 1.



**Ilustración 157 - Resultados de desplazamientos del ensayo 1 de la solución 2 a la izquierda y sin refuerzos a la derecha**

Respecto los resultados tensionales como se puede apreciar en la ilustración 158, el mayor valor de la tensión es de 1410 MPa. Es un valor elevado puesto que supera el límite elástico pero está ubicado en una unión de elementos, por lo que no es recomendable fiarse de estas zonas para guiarse puesto que representan singularidades de tensión, ilustración 160. Comparando estos resultados con los obtenidos en el apartado “7.2.3 Resultados ensayo 1 (carga puntual)”, ilustración 159, ambos son muy parecidos como era de esperar.



**Ilustración 158 - Resultados tensionales del ensayo 1 de la solución 2**



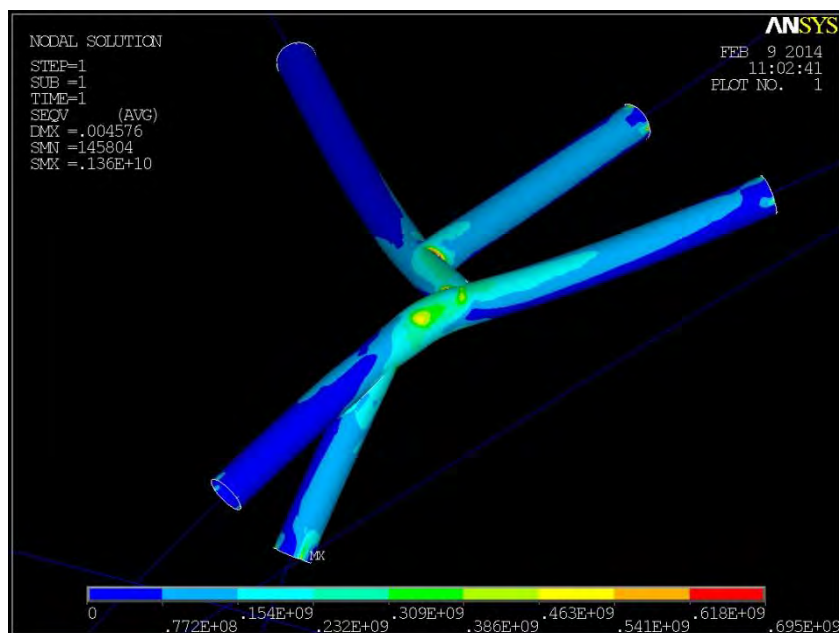


Ilustración 159 - Resultados tensionales del ensayo 1 sin refuerzo de la solución 2

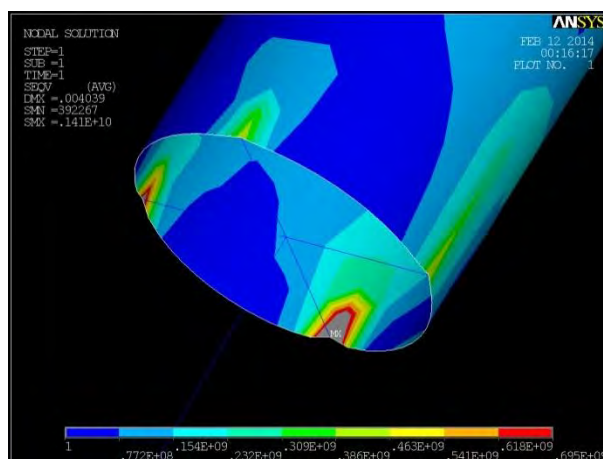
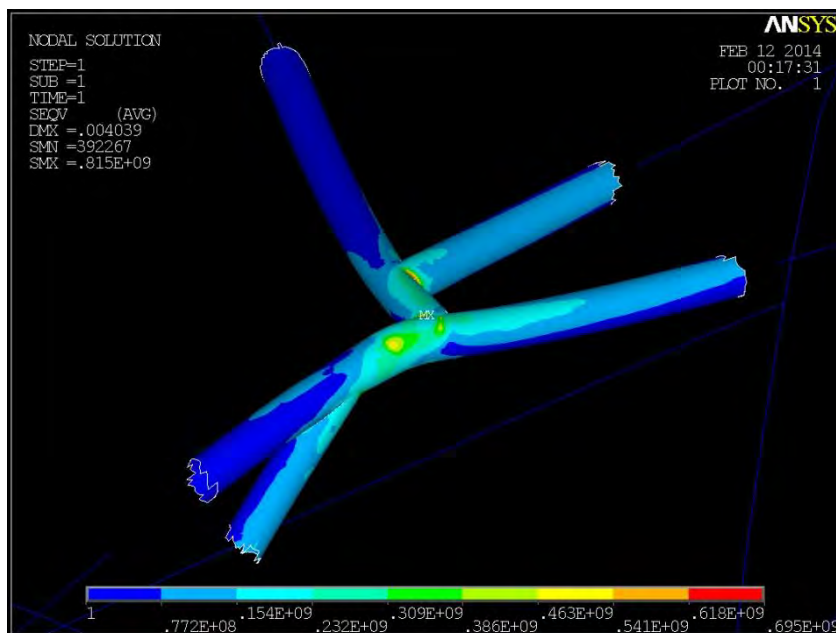


Ilustración 160 - Tensión máxima del ensayo 1 de la solución 2

Para obtener el valor real de tensión máxima se procede a deseleccionar los elementos de dichas zonas conflictivas. Como era de esperar, deseleccionando los elementos de las zonas de unión de elementos Beam y Shell, el valor de la tensión máxima disminuye hasta valer 815 MPa ubicándose en la unión de las cuatro barras. Esta área tampoco refleja el valor exacto de la tensión máxima puesto que se concentra concretamente en una soldadura, pero se puede asegurar al cien por cien que no supera el límite elástico del material, ilustración 161.





**Ilustración 161 - Modelo sin elementos de unión Beam con Shell**

Por lo tanto este modelo también cumple las restricciones de deformaciones y tensionales que impone el ensayo 1.

Para culminar con la prueba se diseños, se puede decir que la estructura inicial más los refuerzos propuestos en la solución 2 que se explicó en el apartado “7.3 *Propuestas de soluciones*”, cumple con todas las limitaciones de desplazamientos y de tensión que impone el Anexo B de la referencia bibliográfica [14]. Además también cumple las indicaciones sobre el material a emplear y las restricciones de geometría de la estructura que impone el anexo A de la referencia bibliográfica [16].

Para ver qué el programa “*Ansys Mechanical APDL*” no ha reaccionado de forma errónea ante los cálculos propuestos de las diferentes estructuras, se va a comparar con el programa CAD CATIA V5 R21. Se va a modelizar la estructura final y después se calcularán los resultados de ambos modelos con dicho programa de diseño 3D.

## 7.4 MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS CON CATIA

Para verificar que la estructura final elegida es la idónea se va a realizar el modelo y los análisis de los dos ensayos con elementos de tipo sólido, a través del programa CAD CATIA V5 R21. A parte de comprobar los resultados obtenidos en capítulos anteriores va a servir para comparar el manejo de ambos programas; al igual que se puede observar cómo se comporta la estructura en el caso del estudio de cargas con los tres tipos de elementos de diseño, Beam, Shell y Sólido.

### 7.4.1 MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Cuando se modeliza una estructura con Catia se debe tener muy presente con qué tipo de geometría se trabaja, debido a que posee un gran número de módulos de trabajo y cada uno es el adecuado para un tipo de estructura. Además que utilizar un módulo u otro al final es decisión personal y la gente se decanta más por el manejo y por experiencias pasadas. En el caso que ocupa el proyecto se tiene una estructura compuesta por barras. Para dibujar barras se puede trabajar cómodamente tanto en el módulo *“Part Design”* como en *“Generative Shape Design”*. La diferencia entre ambos consiste en el tipo de estructura con el que se va a trabajar, en el primero se manejan estructuras con componentes sólidos, es decir, que tienen todas sus componentes de geometría poseen un valor parecido y en el segundo módulo se trabaja con superficies. A simple vista se trabajaría con el módulo *“Part Design”* porque se pueden realizar componentes macizos directamente. Pero por experiencia, puesto que las barras están soldadas y no pueden finalizar en el interior hueco de una colindante, se piensa que será más cómodo definir las barras con el módulo *“Generative Shape Design”* y después dar espesor con el módulo *“Part Design”*.

También hay que tener muy presente que cada vez que se quiera dibujar una geometría se debe iniciar un *“sketch”* definiendo previamente el plano en el que se ubica el componente. Para dibujar la estructura se va a trabajar con el siguiente procedimiento para cada barra:

- 1 En el módulo Part Design se creará un módulo secundario llamado *“Geometrical set”* en el cual se recopilan las acciones realizadas con *“Generative Shape Design”*. Y lo que se realice con el módulo *“Part Design”* se incluye en el apartado *“Part body”*
- 2 Dibujar la línea que define una barra en un sketch con las medidas correspondientes en el módulo *“Generative Shape Design”*.
- 3 Dentro del mismo módulo se va a trabajar con la herramienta *“sweep”*. Esta opción consiste en extruir un perfil a lo largo de una geometría. Por lo tanto en este caso, la geometría a seguir será la línea y el perfil será un círculo cuyo valor

será el radió exterior, para la barras del arco principal 22,5 milímetros y para el resto 20 milímetros. El resultado de utilizar esta herramienta es la creación de superficies.

- 4 Una vez que se han creado todas las superficies se utilizará la herramienta *"Trim"*, con la cual se pueden cortar áreas.
- 5 Con la geometría bien definida se desplazará al módulo *"Part Design"* para definir el espesor de la estructura con la herramienta *"Thick Surface"*. El espesor se definirá con un valor de 4 milímetros y hacia el interior de las superficies.

A continuación ya se describe más detalladamente el procedimiento para modelizar la estructura. En primer lugar se abre el programa Catia y aparece la pantalla de inicio para seleccionar el módulo donde trabajar, ilustración 162.

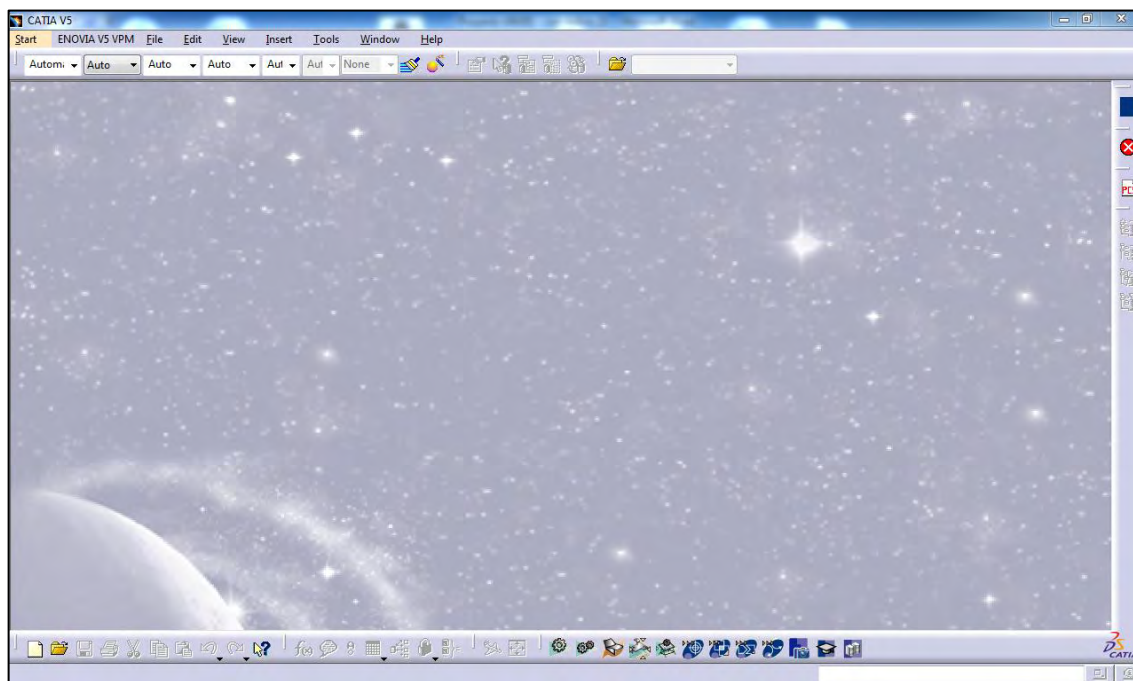


Ilustración 162 - Pantalla de inicio de Catia

Para abrir el módulo de “*Part Design*” se sigue la ruta Start/ Part Design y se abre dicho módulo donde se puede encontrar el cuadro de trabajo y las herramientas que posee este apartado de Catia, ilustración 163.

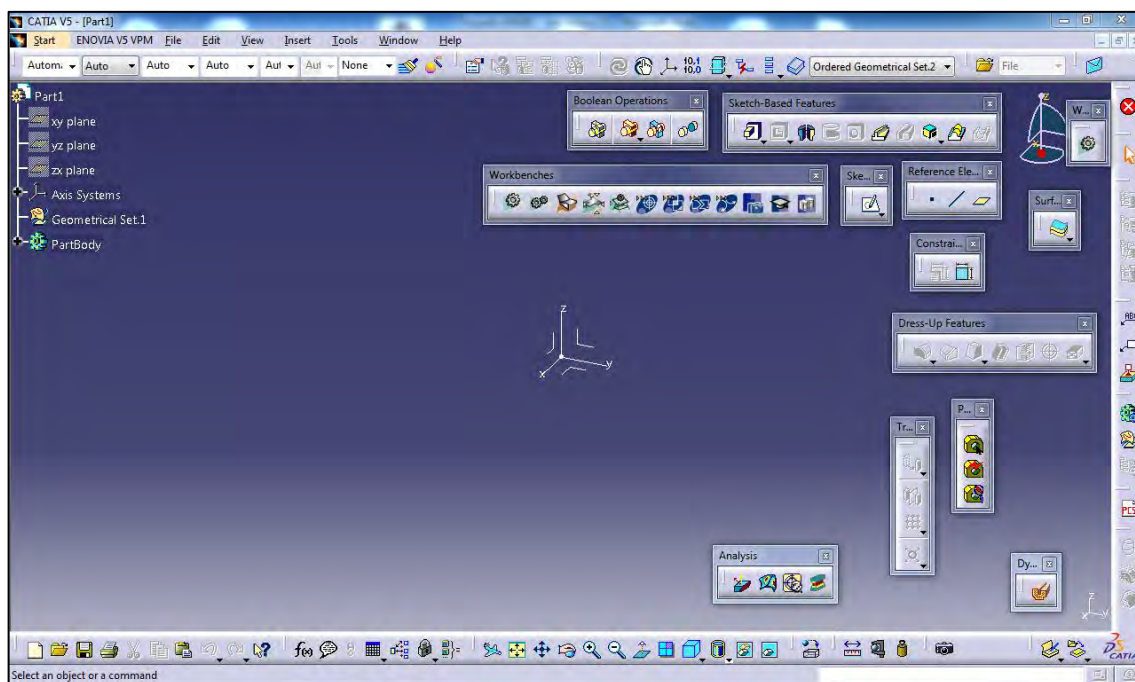






Ilustración 163 - Pantalla de trabajo de Part Design

El primer paso es insertar el “*Geometrical set*” y para ello se elige Insert/ Geometrical set. Como se puede observar en la ilustración 163 en el árbol de la derecha de dicha imagen aparece el Part Body y el Geometrical set. En este árbol va ir apareciendo todas las opciones que utilizemos con el programa.

A continuación se empieza a dibujar la estructura en Sketch, para ello la primera barra a dibujar va a ser el arco principal completo. Para ello se crea un plano a 1170 milímetros del plano YZ de los ejes referenciales globales con la herramienta “Plane”  y después se crea un sketch con la opción “Positioned Sketch” . Cuando se está situado dentro del sketch, se dibuja la geometría del arco principal con las herramientas “Line”  para crear las líneas de las barras y también “Edge fillet”  para crear los radios de acuerdo. Realizando todas estas operaciones el sketch del arco principal queda según se representa en la ilustración 164.

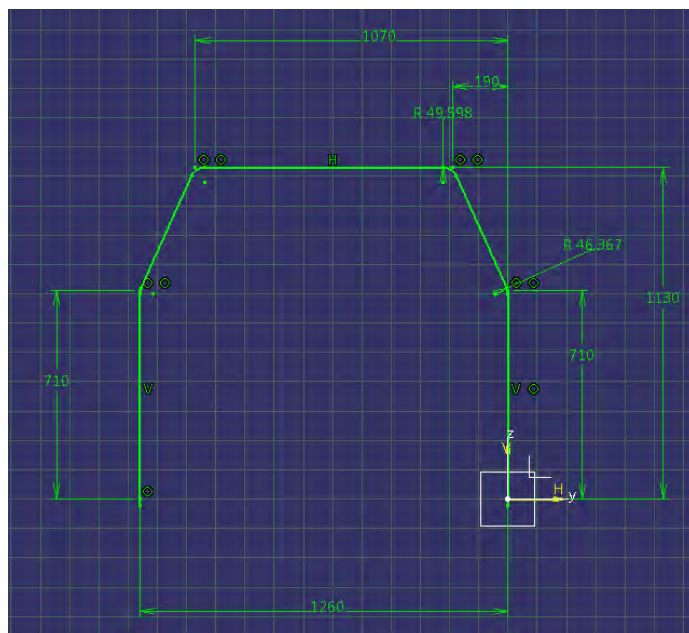


Ilustración 164 - Sketch del arco principal

Una vez que se ha creado la línea que hace de guía para extruir se debe dibujar el perfil de la barra. Para ello se crea un plano perpendicular a una de las líneas verticales de la ilustración 164, se crea un nuevo sketch en dicho plano y se dibuja un círculo de radio 22,5 milímetros cuyo centro sea coincidente con el final de la línea vertical, ilustración 165.

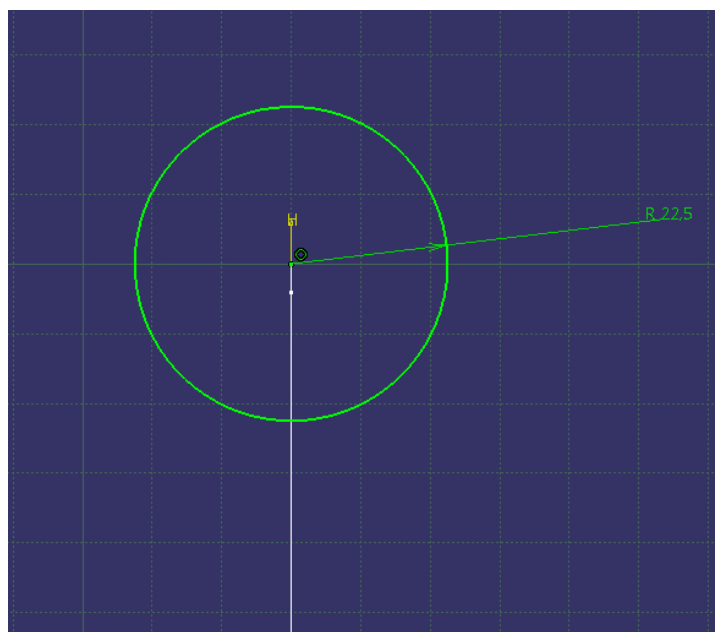



Ilustración 165 - Sketch del perfil de la barra



Ahora para crear las superficies que constituyen la barra se abre el módulo “Generative Shape Design” y se selecciona la herramienta “sweep”  y aparece en pantalla el cuadro de opciones de dicha herramienta, ilustración 166. En el apartado “Profile” se elige el sketch donde se ha dibujado el círculo de 22,5 milímetros y en “Guide curve” se escoge el sketch que contiene la línea que define la barra.

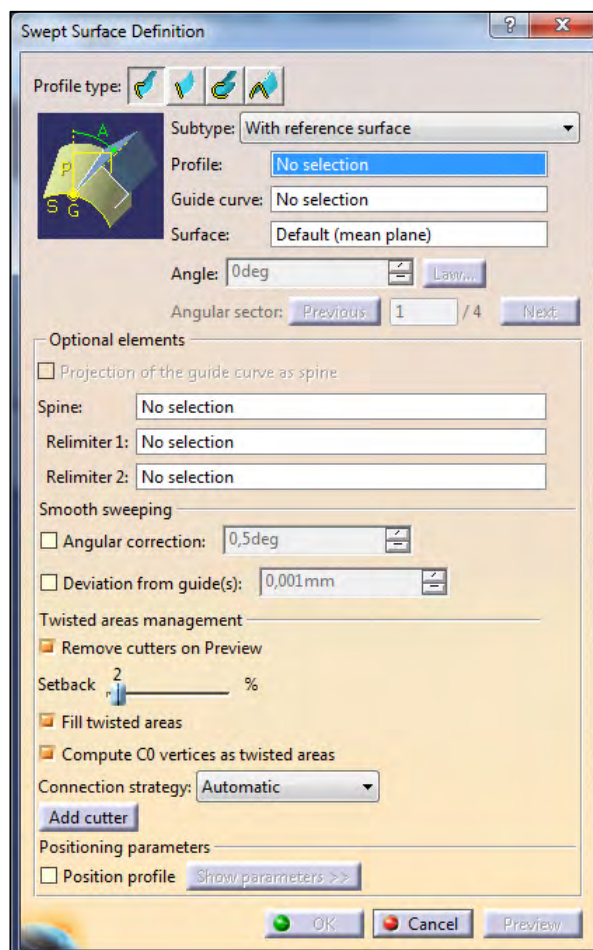
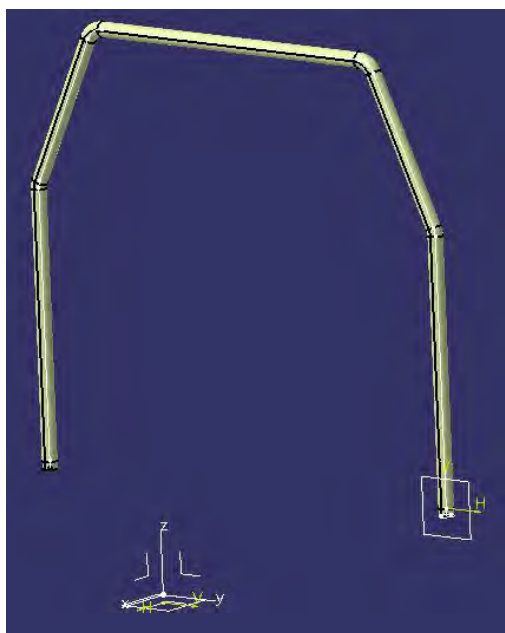


Ilustración 166 - Ventana de opciones de la herramienta “sweep”

Una vez que se ha aceptado esta acción aparece en pantalla la superficie que define el perfil de todo el arco principal como se observa en la ilustración 167.





**Ilustración 167 - Superficies del arco principal**

Después de haber realizado una barra se debe empezar a crear, por ejemplo uno de los dos tirantes traseros. En este caso se empieza poniendo un punto que defina el extremo inferior de dicha barra. Ahora se elige la herramienta “Line” y se unen el punto que se acaba de crear con un punto definido en el sketch del arco principal, este punto se puede observar en la ilustración 168, donde se visualizan todos los requisitos necesarios para extruir las superficies de dicha barra. En este momento se tiene la guía de la extrusión pero falta dibujar el perfil. Para ello se crea un plano perpendicular a la línea que se acaba de crear. Y en dicho plano se crea un sketch donde se dibuja una circunferencia de radio 20 milímetros.




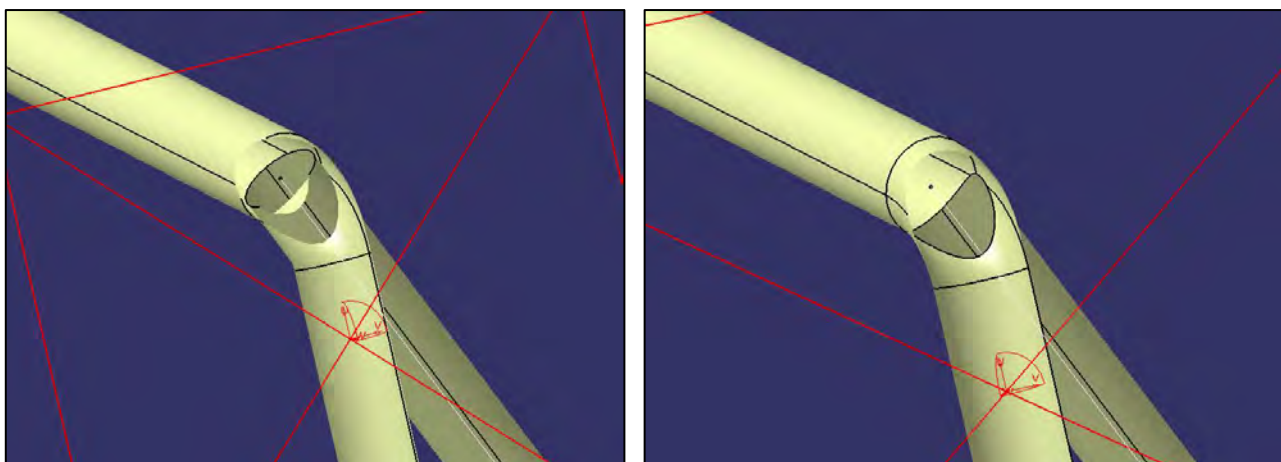
**Ilustración 168 - Perfil y guía del tirante trasero izquierdo**

Ya se han creado la guía y el perfil de la barra, por lo tanto, ahora se utiliza la herramienta “sweep” para crear el área, ilustración 169.



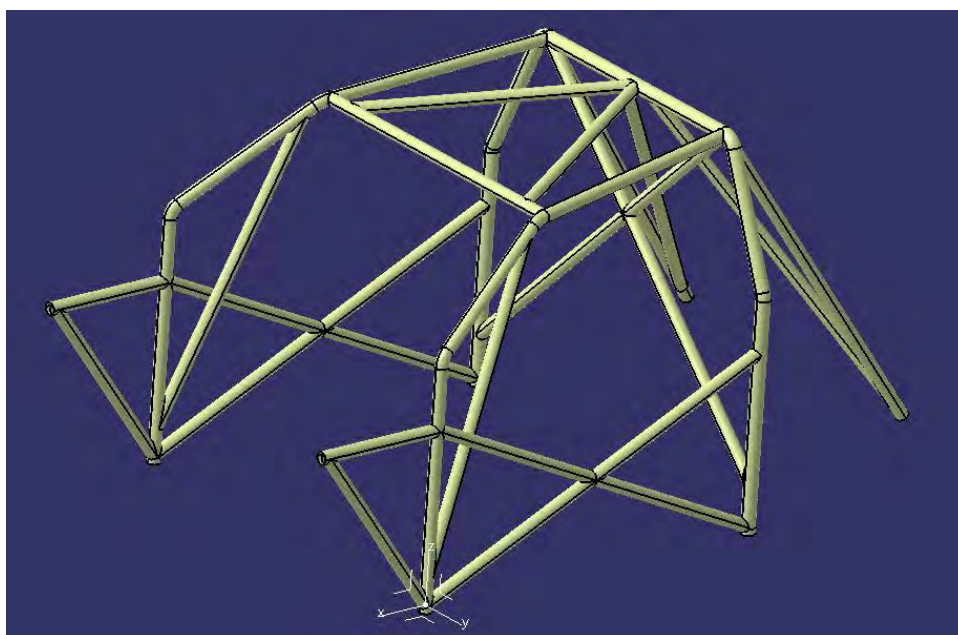
**Ilustración 169 - Superficies del arco principal y tirante trasero**

Aunque parezcan que las barras están bien unidas no es así porque el extremo superior del tirante trasero se ha introducido dentro de las superficies que define el arco principal. Este hecho se puede observar en la imagen izquierda de la ilustración 170. Para solventar este problema se utiliza la herramienta “Trim”, con la cual se puede cortar superficies entre sí y después se elige con que parte de las superficies se quiere quedar. El resultado de utilizar la opción “Trim”  se observa en la imagen derecha de la ilustración 170. Donde las barras están perfectamente cortadas y listas para pasar a la construcción de otro componente de la estructura.



**Ilustración 170 - Sin usar Trim a la izquierda y usándolo a la derecha**

Para el resto de barras se ha seguido el mismo procedimiento que para el tirante trasero, es decir, se crea en un nuevo sketch el perfil de la barra con las dimensiones propias de cada componente, se genera un plano perpendicular al perfil y en dicho plano se dibuja el perfil de la barra con un diámetro de 20 milímetros, después se utiliza la herramienta “sweep” para extruir el perfil a lo largo de la guía para crear las superficies de la barra y por último se cortan las áreas de la nueva barra con el conjunto de barras ya creadas. En la ilustración 171 se observa el conjunto de superficies que definen todas las barras de la estructura ya cortadas y preparadas para crear en el módulo “Part Design” el espesor de 4 milímetros de la estructura completa.



**Ilustración 171 - Diseño de la estructura final con Catia**

Para que el programa no de ningún error a la hora de crear el espesor, se debe alargar 20 milímetros las barras que no estén inclinadas en las uniones donde se coloquen los pies de anclaje de la estructura. Porque si no se realiza esta operación las barras de estas uniones no se pueden cortar correctamente y el programa no es capaz de incorporar el espesor en dichas barras. Un ejemplo de cómo quedaría la unión se observa en la ilustración 172. En la ilustración 173 están señaladas las uniones donde se deben realizar dichos alargamientos.

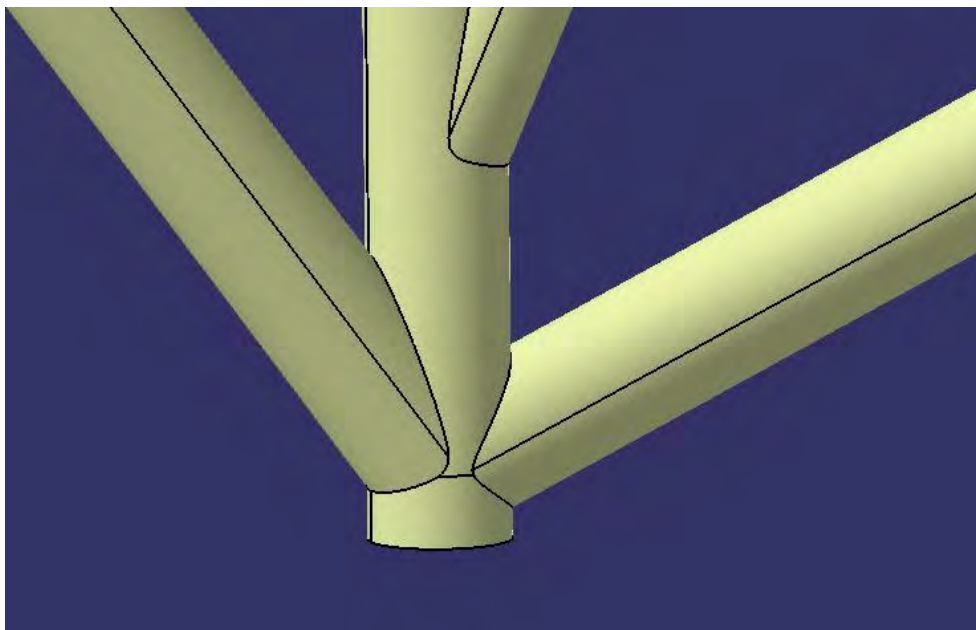


Ilustración 172 - Ejemplo de diseño de un pie de anclaje

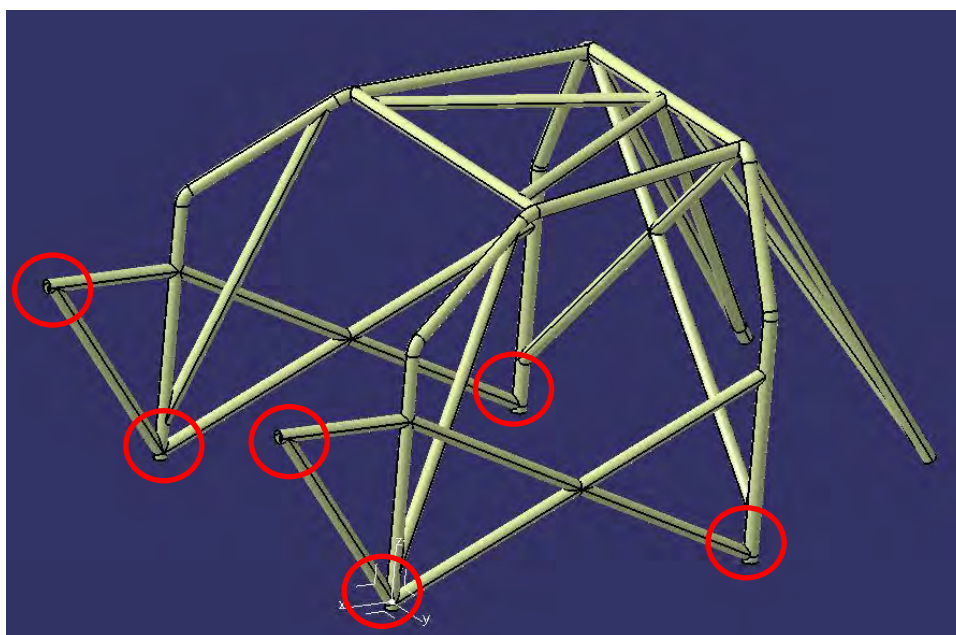




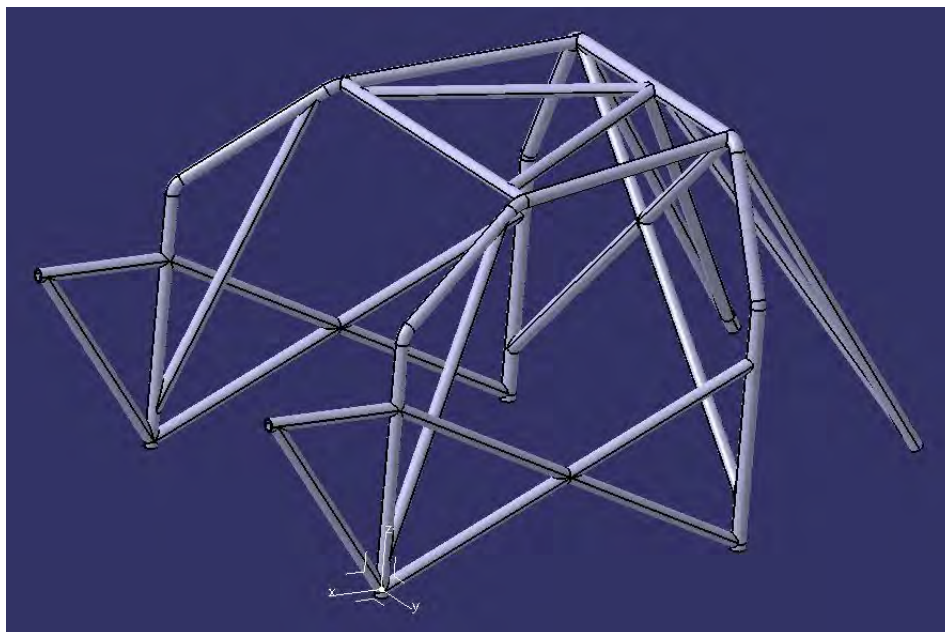
Ilustración 173 - Pies de anclaje donde realizar alargamiento

A continuación se deben englobar todas las operaciones que se han realizado en una sola, para ello, se utiliza la herramienta “Join” . Esta acción va a facilitar mucho a la hora de crear el espesor.


Una vez que se tienen todas las superficies creadas y englobadas en un “Join” se pasa al módulo “Part Design” y se selecciona la herramienta “Thick Surface”  para crear el espesor de la estructura. Después de elegir esta opción se escoge la operación

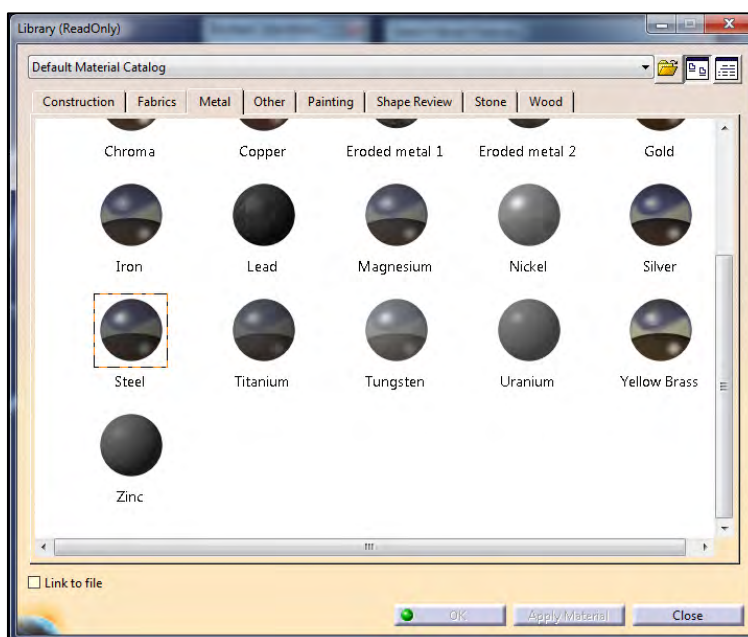


“Join” del árbol de operaciones de la izquierda de la pantalla y aparece la estructura con unas flechas naranjas en las superficies. Entonces se eligen que las flechas vayan para dentro de la estructura y se pone el valor de 4 milímetros en la ventana de opciones de “Thick Surface”. En la ilustración 174 se observa la estructura completa con el espesor creado.



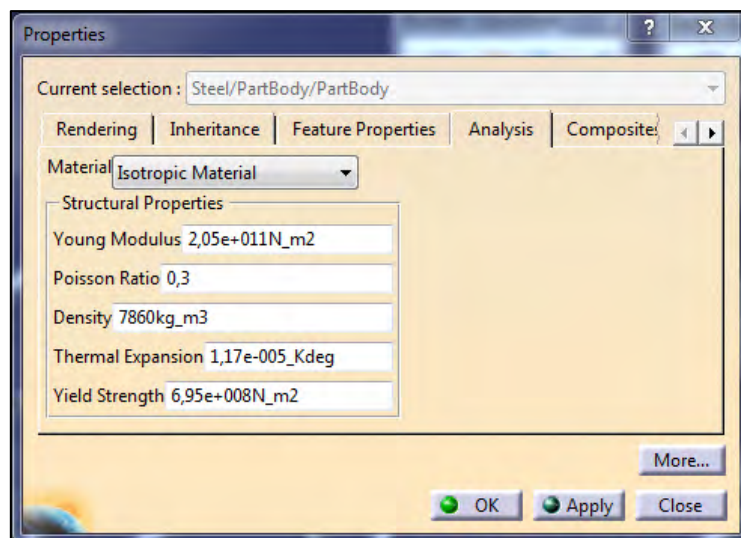
**Ilustración 174 - Estructura final con espesor 4 milímetros**

Para terminar este apartado donde se define el modelo sólo falta otorgar a la estructura el tipo de material en la herramienta “Apply material”  del programa. Cuando se elige esta opción aparece en pantalla la ventana de la ilustración 175.



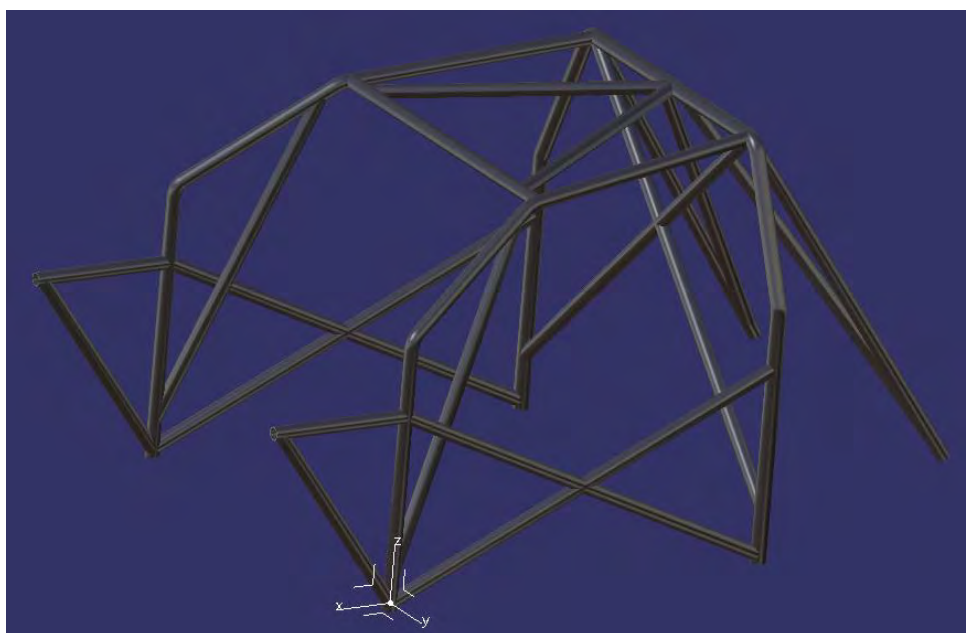
**Ilustración 175 - Librería de materiales de Catia**

Donde se elige en la pestaña “Metal” el material “Steel”. Este acero tiene unas propiedades determinadas que no se corresponden con las del material que se ha elegido en el apartado “5 Material”. Para definir las propiedades correctas se hace botón derecho sobre la operación “Steel” del árbol de la izquierda, se elige la opción “Properties” y sale en pantalla una ventana para introducir dichas propiedades, ilustración 176.



**Ilustración 176 - Propiedades del material 25CrMo4**

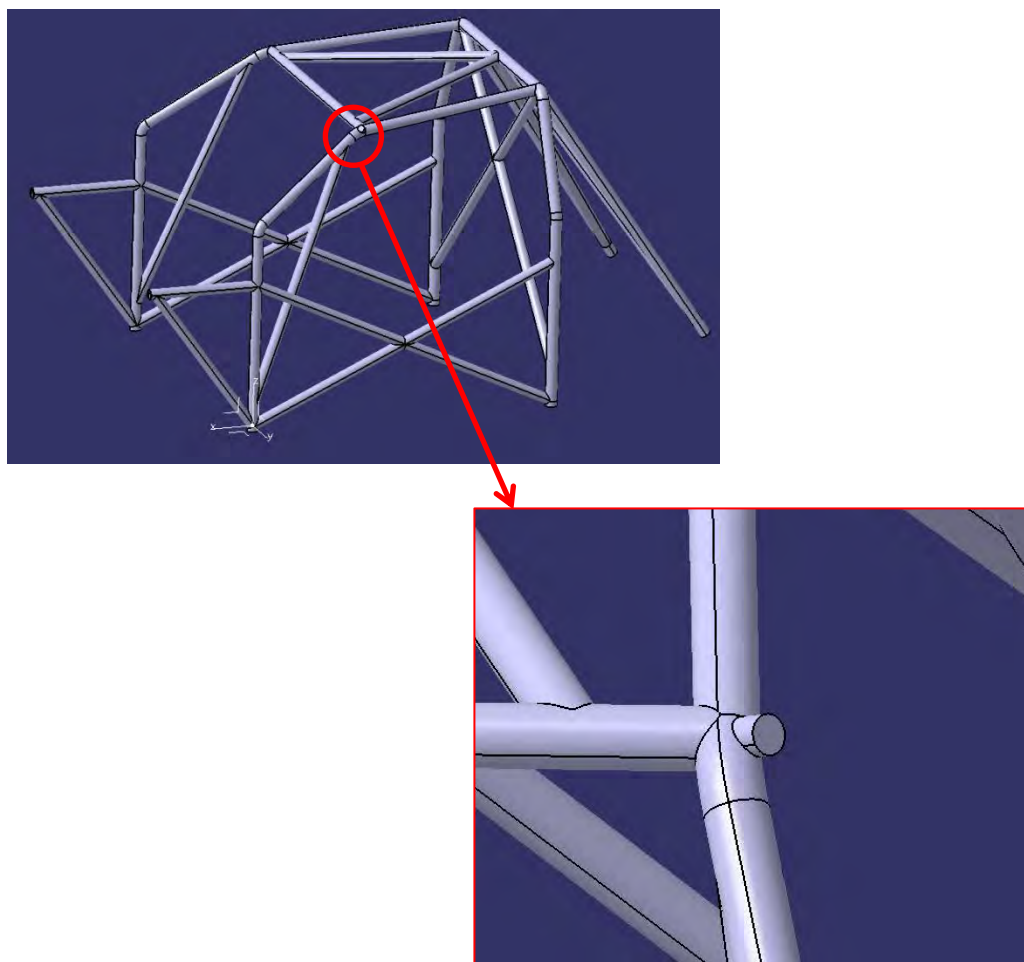
Una vez que se ha introducido el material deseado en el programa, la estructura aparece pintada con una secuencia de colores de gris a negro ilustrando que se ha elegido un tipo de acero como material para la estructura, ilustración 177.



**Ilustración 177 - Estructura final con material**



Esta es la estructura final con la que se realiza el ensayo 2 de la carga distribuida, pero para elaborar el ensayo 1 con la carga puntual es necesario realizar una modificación para poder ubicar la carga. Esta modificación consiste en incorporar una protuberancia en la unión donde se aplica la carga puntual. Para ello se crea un plano a 7 milímetros de la unión con las restricciones geométricas de la ilustración 24, después se crea un círculo de diámetro 25 milímetros y se extruye hasta la superficie que define la unión. Esta modificación se observa en la ilustración 178, el resto de la estructura permanece igual.



**Ilustración 178 - Modificación de la estructura para aplicar la carga puntual**

Por lo tanto, el modelo de la estructura se ha terminado. A continuación en los siguientes apartados se definen los análisis creados para obtener los resultados del programa.

## 7.4.2 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA FINAL MEDIANTE ENSAYO 1

En el presente punto del proyecto, como se realizó en apartados anteriores de análisis, se va a establecer una malla en la estructura, se va a poner restricciones de movimiento en los pies de anclaje y se ubicará la carga puntual del ensayo. Para realizar todas estas operaciones se accede al módulo Start/ Analysis and Simulation/ Generative Structural Analysis y aparece una nueva interfaz del programa con nuevas herramientas y la estructura que se ha definido en los anteriores módulos con el material ya adjudicado.

El primer paso es mallar la estructura haciendo doble clic sobre la función “OCTREETetrahedron Mesh 1” del árbol de la izquierda de la pantalla, se abre la ventana de la ilustración 179 donde se establecen las características de la malla. Se indica que el tipo de elemento de la malla sea “Linear” y tenga un tamaño de 20 milímetros. En la ilustración 180 se observa la malla que el programa ha realizado para la estructura.

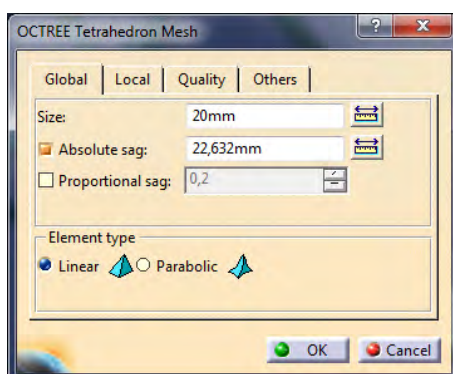


Ilustración 179 - Ventana de propiedades del mallado

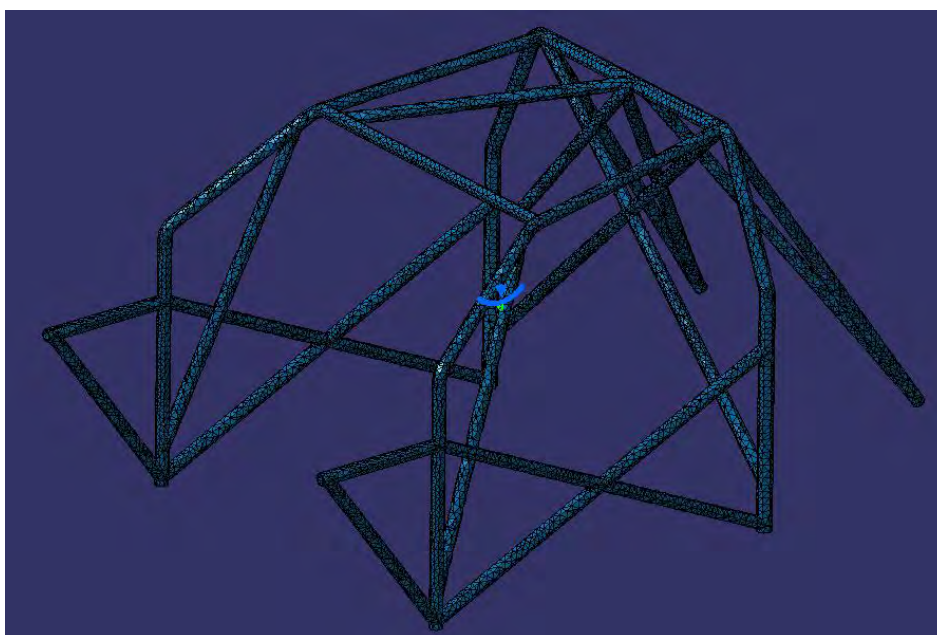




Ilustración 180 - Mallado de la estructura final

Después de mallar la estructura se procede a ubicar las restricciones de movimientos en los ocho pies de anclaje con la herramienta “Clamp” . Y el último paso del análisis es ubicar la carga en el modelo y dar los valores a cada componente. Para ello, se elige la opción “Distributed Force” , con esta herramienta se aplican cargas distribuidas y para este ensayo se utiliza una carga puntual, pero como se ha definido un área muy pequeña para su ubicación se puede elegir esta herramienta porque dicha carga distribuida se asemeja mucho a una carga puntual. Una vez que se ha elegido esta opción se introducen los valores de las cargas en los ejes X, Y, Z seleccionando el área de la modificación como superficie de ubicación. Los valores de las cargas son:

$$F_x = -17528,1 \text{ N}$$

$$F_y = -37446,1 \text{ N}$$

$$F_z = -3276,11 \text{ N}$$

En la ilustración 181 se observa la estructura con las restricciones de movimiento y las cargas ubicadas en sus sitios correspondientes.

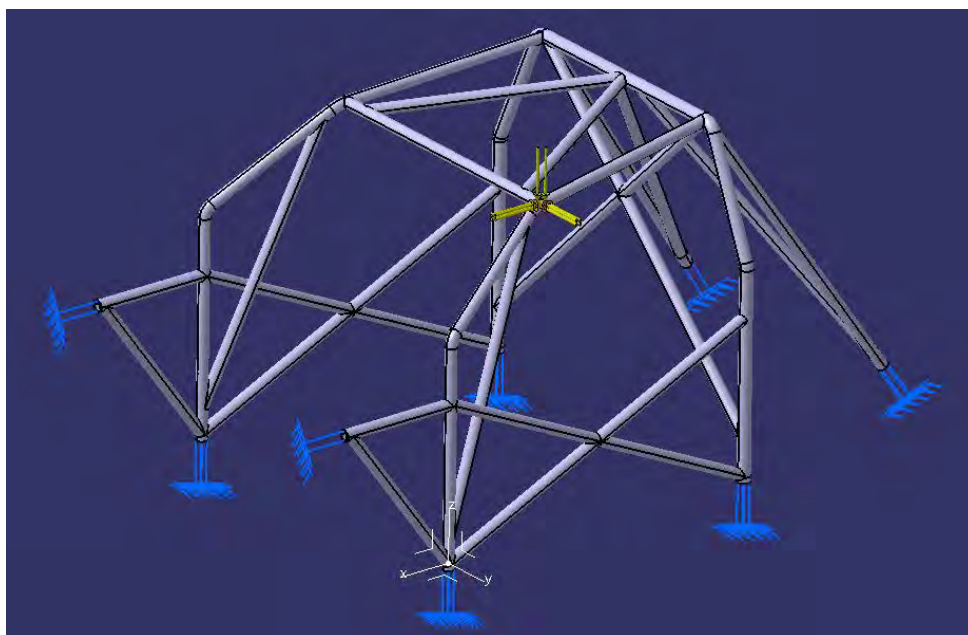


Ilustración 181 - Estructura final con carga puntual y restricciones de movimientos

### 7.4.3 RESULTADOS DE LA ESTRUCTURA FINAL MEDIANTE ENSAYO

#### 1

En la imagen superior de la ilustración 182 se puede observar los resultados que el programa ha arrojado respecto los desplazamientos. Como se puede apreciar la distribución de desplazamientos es casi idéntica a los resultados proporcionados con “Ansys” ilustrados en la imagen inferior de la ilustración 182. Se dan en ambas imágenes que los máximos valores se localizan en ambas uniones de los semiarcos laterales con el miembro transversal. La única diferencia se da en el valor del desplazamiento máximo, que con el programa “Catia” sale 4,97 milímetros y en “Ansys” 4,039 milímetros. Esto se debe a que ambos programas no trabajan de la misma forma.

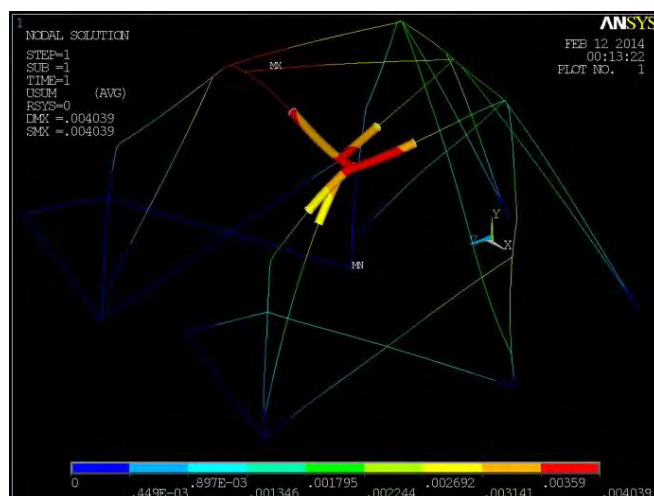
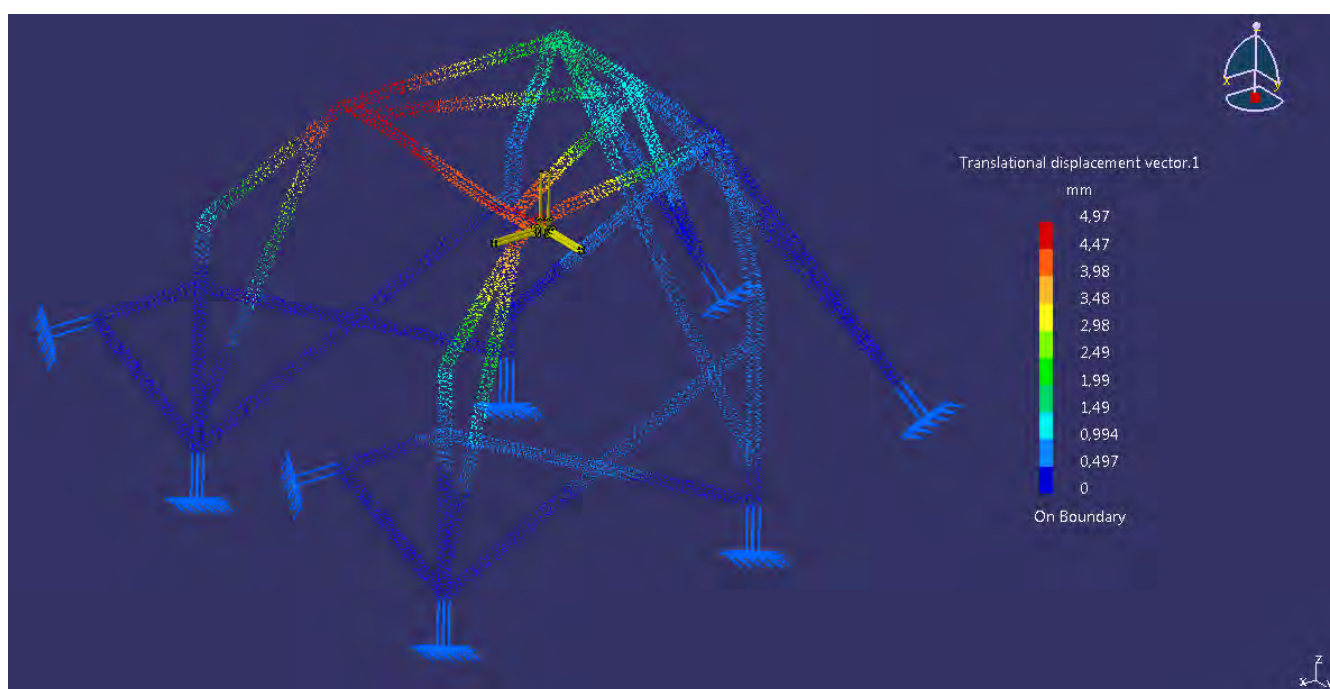
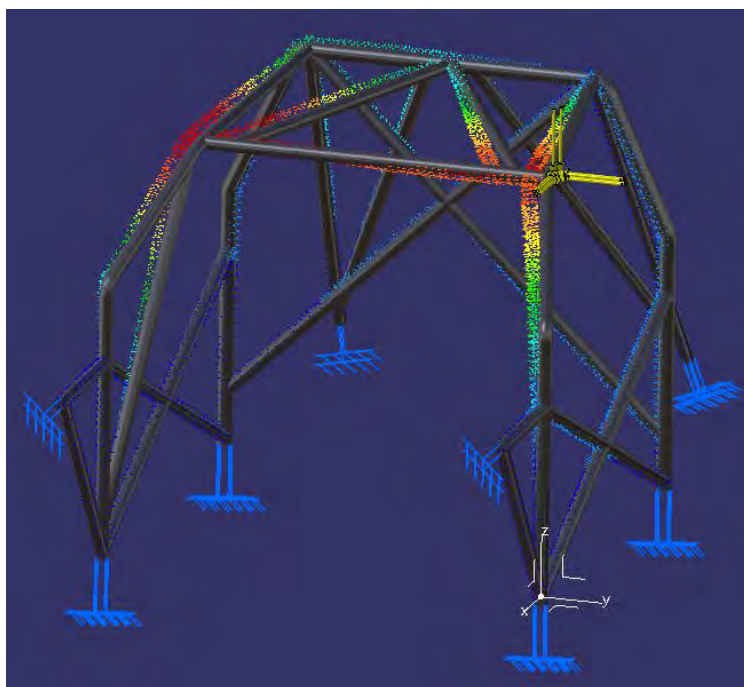


Ilustración 182 - Resultados de desplazamientos con Catia en la parte superior y con Ansys en la parte inferior

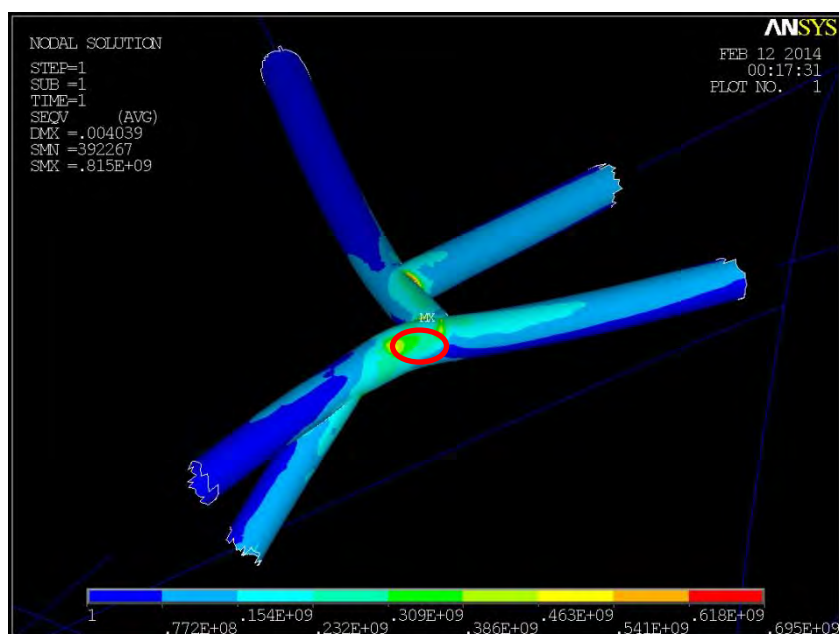
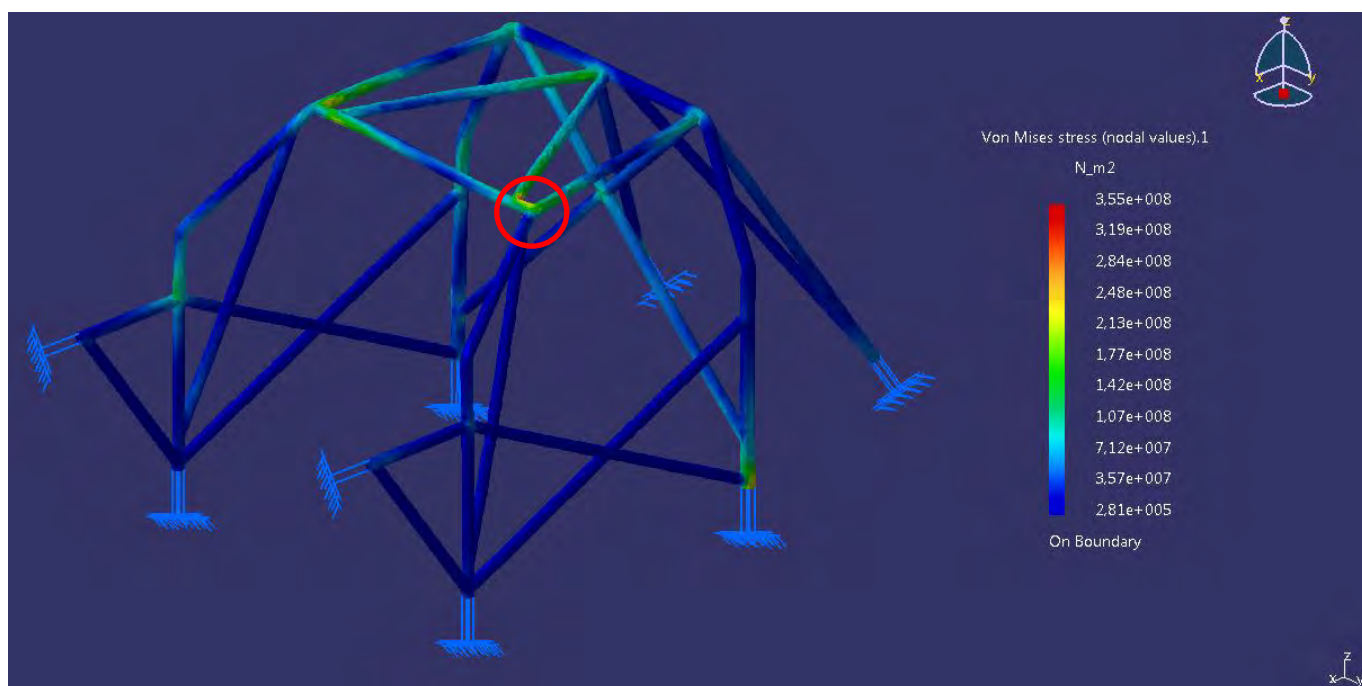


La deformada de la estructura, que se puede observar en la ilustración 183, posee unos desplazamientos acordes a las repercusiones que tiene aplicar una carga puntual con dichas dimensiones geométricas. En la zona de aplicación de la carga se produce un desplazamiento negativo en el eje “Z”, ocasionando el efecto contrario en la parte superior del arco principal. Debido a que en el eje “Y” se aplica la mayor parte de la carga, en la unión del miembro transversal con el semiarco lateral derecho se puede observar que hay un desplazamiento muy grande en el sentido negativo del eje “Y”.



**Ilustración 183 - Comparación de la estructura sin deformar y deformada respecto ensayo 1**

Respecto el estado tensional se observa en la imagen superior de la ilustración 184 que la distribución de tensiones en la unión es muy parecida a la que se muestra en la imagen inferior de la ilustración 184 proporcionado por “Ansys”. Las barras más cargadas en ambos casos son los tirantes de refuerzo del parabrisas y del techo al igual que la barra superior de los semiarcos. El resultado de la tensión máxima arrojado por Catia es de 355 MPa, produciéndose en una zona de soldadura de la unión donde se aplica la fuerza. Para comparar los resultados obtenidos por los programas Catia y Ansys se debe estudiar la tensión en un punto dentro de las zonas delimitadas con un círculo rojo de las imágenes superior e inferior de la ilustración 184, respectivamente. El valor de la tensión obtenido con Catia es de 234 Mpa y el de Ansys 285 Mpa, ambos resultados son mínimamente diferentes, aun así dicha disparidad no es muy grande teniendo en cuenta que son valores muy por debajo del límite elástico del material.



**Ilustración 184 - Resultados tensionales con Catia en la parte superior y con Ansys en la parte inferior**

Todos estos valores siguen cumpliendo las restricciones impuestas por el Anexo B ubicado en la referencia bibliográfica [14] referente al ensayo 1. El valor máximo de deformación es 4,97 estando muy por debajo de los 100 milímetros permitidos y la tensión máxima es 355 MPa que si se compara con los 695 MPa del límite elástico del material, las barras no soportan deformación plástica.



#### 7.4.4 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA FINAL MEDIANTE ENSAYO 2

En este apartado se siguen los mismos pasos que se han descrito en el apartado “7.4.2 Análisis de la estructura final mediante ensayo 1”. Las únicas diferencias son que se trabaja con el modelo de la estructura que no tiene la modificación y que la ubicación y el valor de la carga son diferentes, tratándose en este caso de una carga distribuida.

Para introducir la carga se selecciona la herramienta “Distributed Force” y se elige como ubicación la barra horizontal del arco principal. Como valor de la fuerza se introduce en dirección del eje “Y”:

$$F_Y = -88875 \text{ N}$$

En la ilustración 185 se observa la estructura del arco de seguridad con la carga distribuida aplicada y las restricciones de movimiento en su sitio.

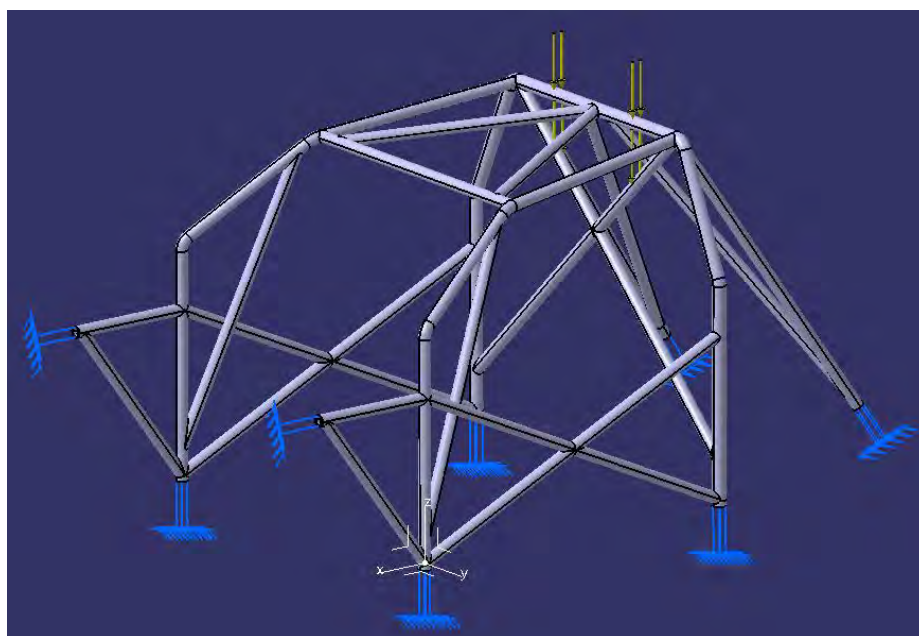


Ilustración 185 - Estructura final con carga distribuida y restricciones de movimientos

#### 7.4.5 RESULTADOS DE LA ESTRUCTURA FINAL MEDIANTE ENSAYO 2

La distribución de desplazamientos que proporciona el programa “Catia” con el ensayo 2 se puede observar en la imagen superior de la ilustración 186 y los resultados obtenidos con “Ansys” del mismo ensayo se muestran en la imagen inferior de la ilustración 186. Al comparar ambos resultados se observa que las distribuciones de desplazamientos en ambos programas son muy parecidas situándose los valores con

mayor desplazamiento en el centro de la barra horizontal del arco principal. Es lógico que se concentren estos desplazamientos en dicha barra porque en esta zona se aplica la carga distribuida. El valor del desplazamiento máximo que proporciona “Catia” es de 3,27 milímetros siendo un poco menor al proporcionado por “Ansys” que valía 6,48 milímetros. La diferencia entre ambos valores no es muy grande por lo que ambos análisis se dan como correctos.

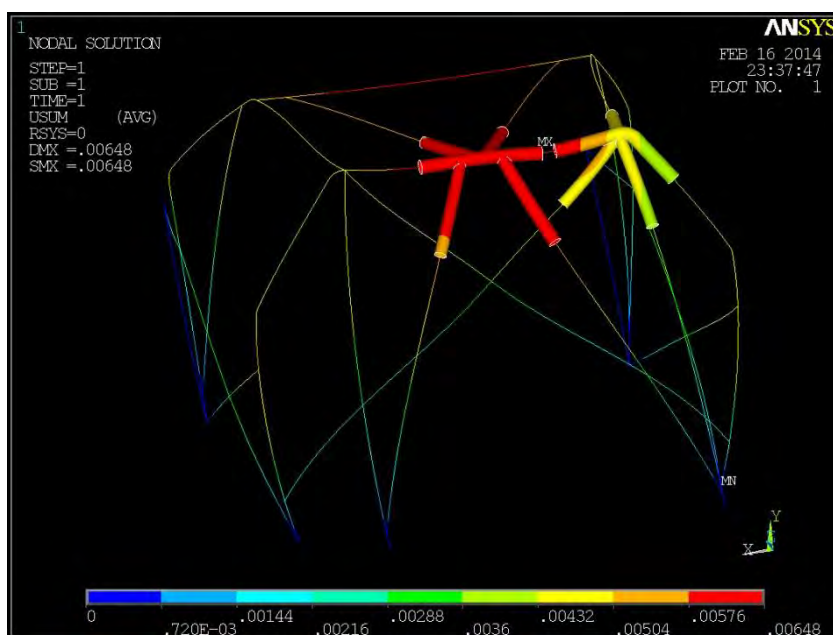
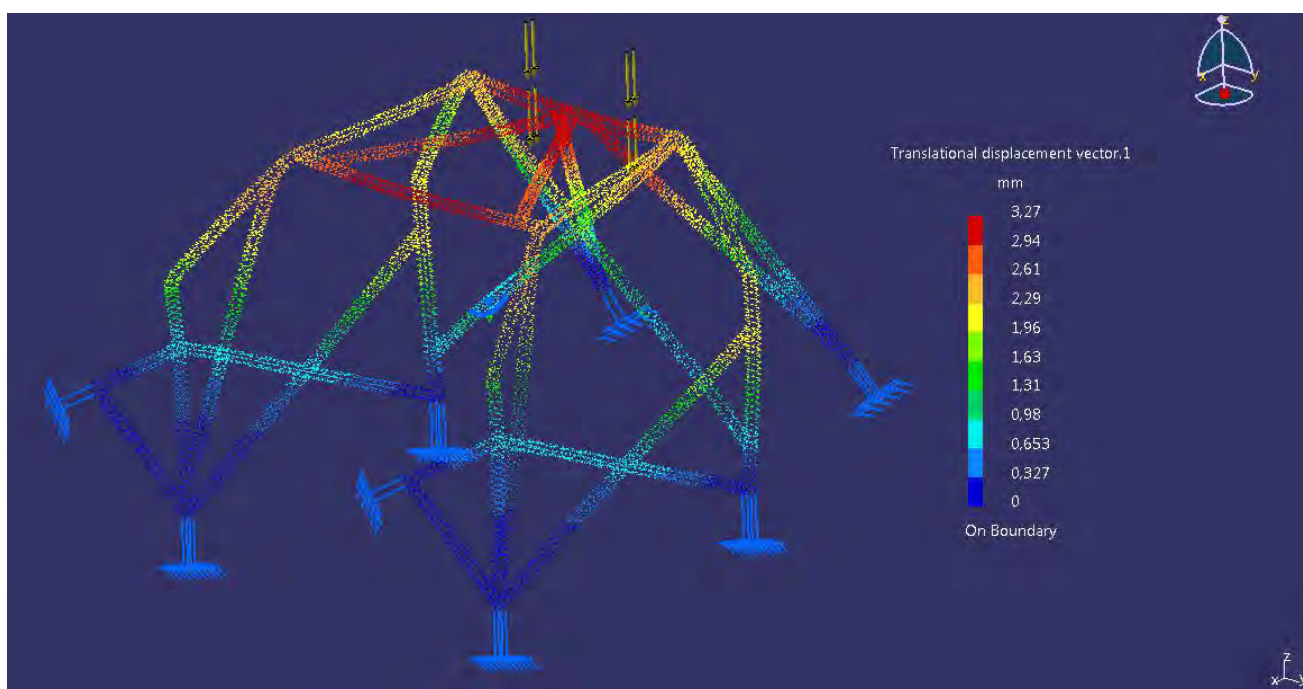
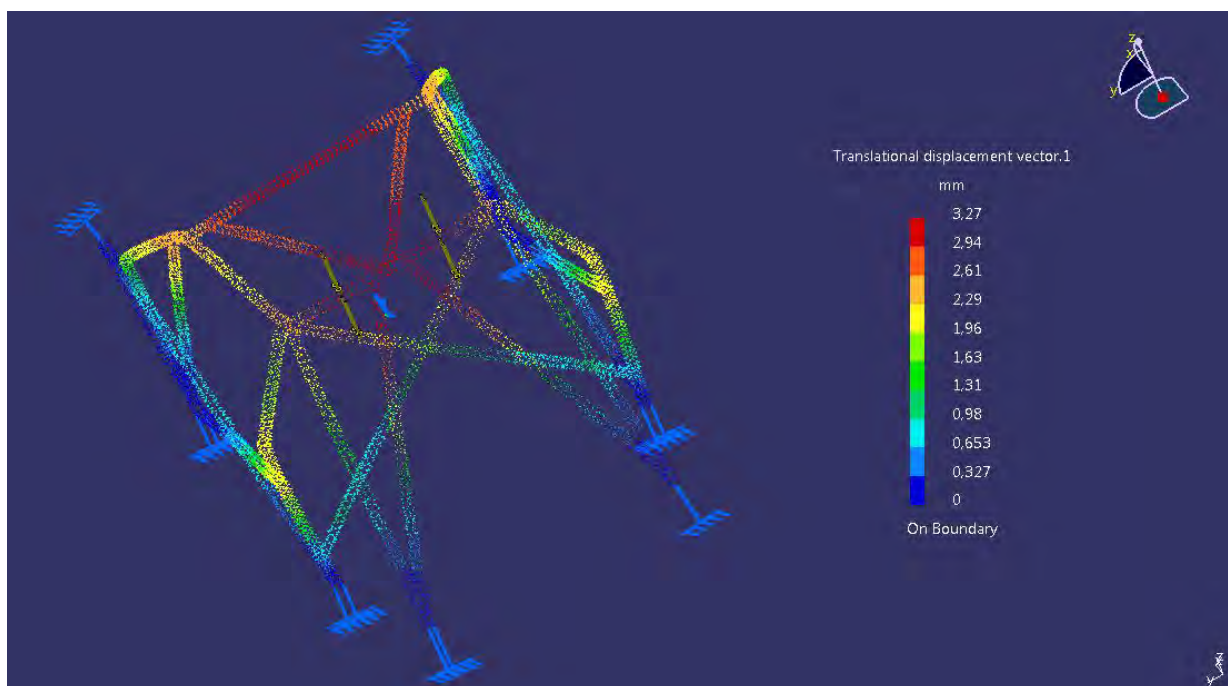
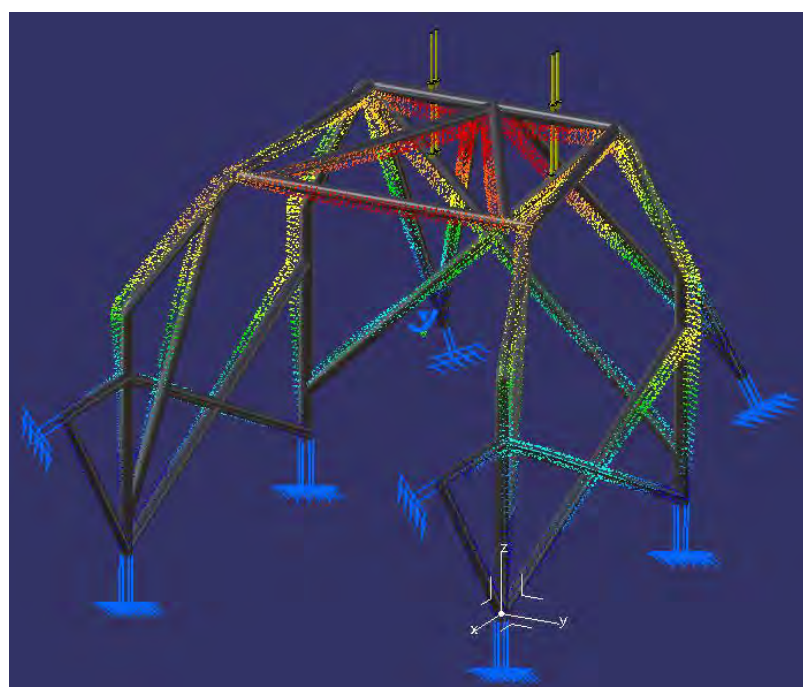


Ilustración 186 - Resultados de desplazamientos con Catia en la parte superior y con Ansys en la parte inferior



**Ilustración 187 - Otra vista de los resultados de deformación con Catia**

En la ilustración 188 se puede observar la deformada de la estructura, reflejándose las barras originales en color gris. El arco de seguridad se deforma como era de esperar, produciéndose un desplazamiento en sentido negativo del eje “Z” en la barra de aplicación de la fuerza y siendo positivo en la parte delantera del techo.



**Ilustración 188 - Comparación de la estructura sin deformar y deformada respecto ensayo 2**

El valor de la tensión máxima según el programa “Catia” es de 342 MPa, ilustración 189. No se supera el límite elástico del material por lo que en la estructura no se produce plastificación ni se llega al límite de rotura del material. Para comprobar que ambos programas de cálculo de elementos finitos trabajan de una forma parecida se compara un valor de la tensión en el mismo punto en ambos modelos. El punto elegido pertenece a la unión del extremo de la derecha de la barra horizontal del arco principal con el semiarco derecho. Esta zona se representa en la ilustración 189 perteneciente a Catia y en la 190 perteneciente a Ansys con un círculo rojo. El valor de la tensión con Catia es de 82,6 MPa y el valor proporcionado por Ansys es de 89,9 MPa. Los resultados obtenidos por ambos programas son un poco dispares, pero esta diferencia no es muy importante porque están muy por debajo del límite elástico del material. Respecto las distribuciones de tensiones, en ambos modelos, son muy parecidas situándose tensiones elevadas en las uniones de los extremos de la barra horizontal del arco de seguridad.

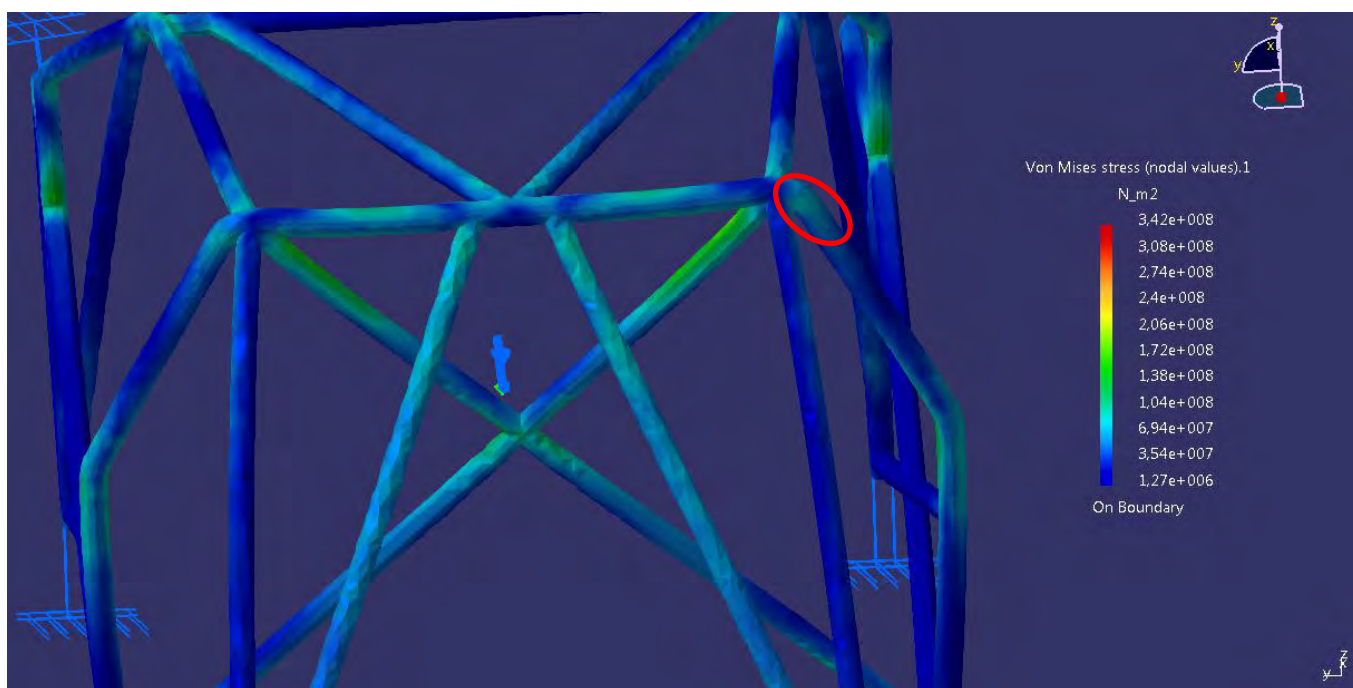


Ilustración 189 - Resultados tensionales con Catia del ensayo 2



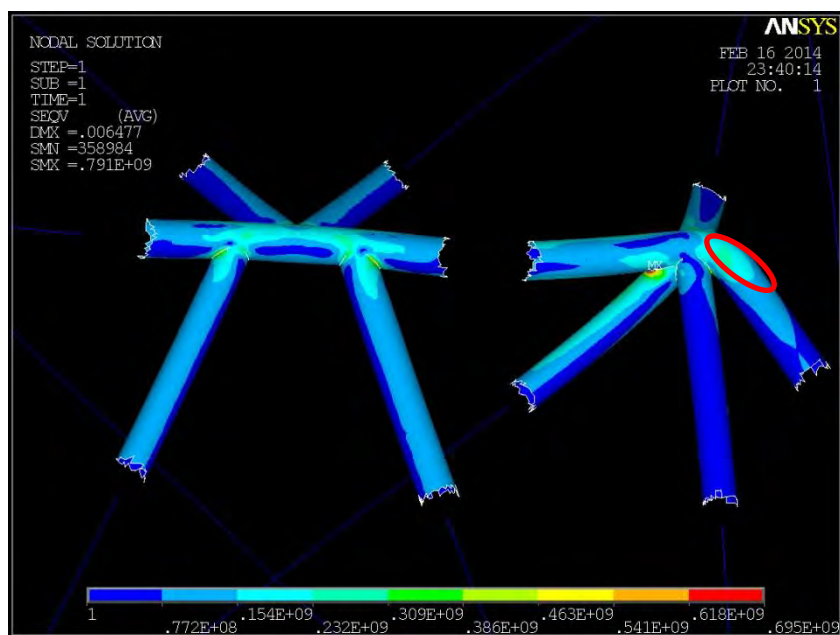


Ilustración 190 - Resultados tensionales con Ansys del ensayo 2

Respecto el Anexo B de la referencia bibliográfica [14] se pueden dar por buenos los resultados del programa “Catia” de la estructura final mediante el ensayo 2. Porque el desplazamiento máximo es de 3,27 milímetros siendo menor de 50 milímetros que es el máximo permitido por dicho anexo y la tensión máxima no supera el límite elástico del material que era la segunda restricción del anexo B. Además se puede observar que ambos programas trabajan de una forma parecida al no dar resultados muy dispares.

## 8 IMÁGENES DE LA ESTRUCTURA FINAL

En este capítulo se puede observar la estructura final elegida que cumple todas las restricciones de homologación de los dos tipos de ensayos realizados.

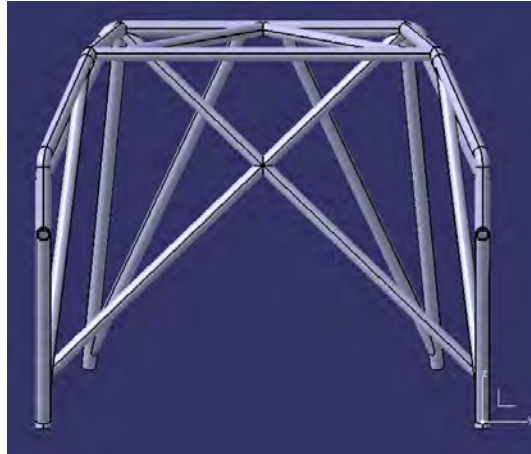


Ilustración 191 - Alzado de la estructura final

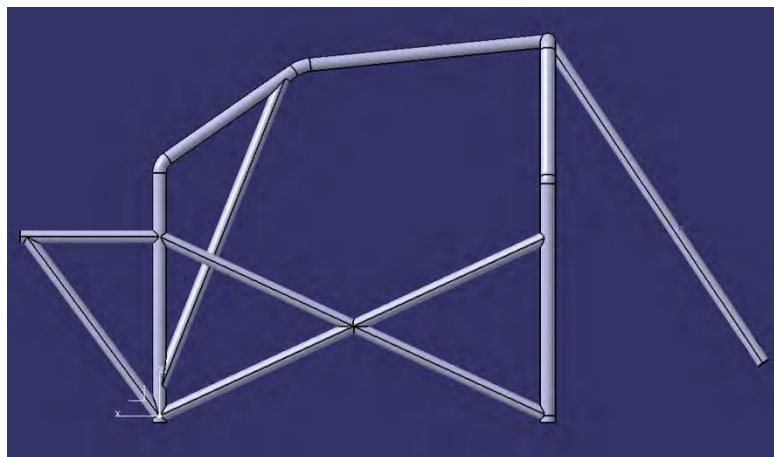


Ilustración 192 - Perfil izquierdo de la estructura final

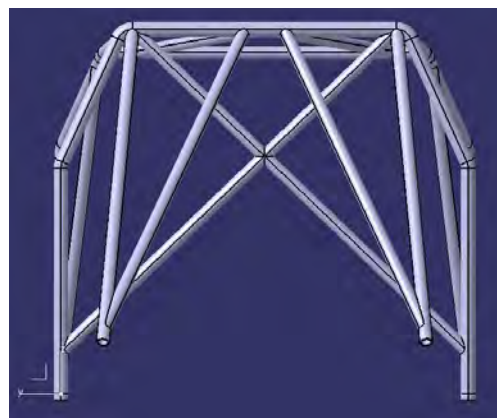


Ilustración 193 - Parte trasera de la estructura final



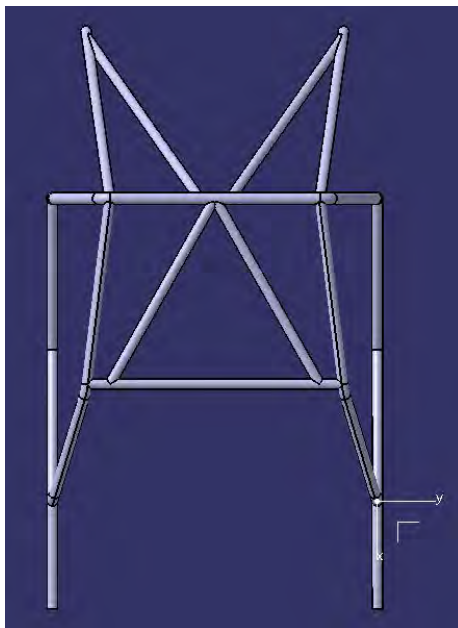


Ilustración 194 - Planta de la estructura final

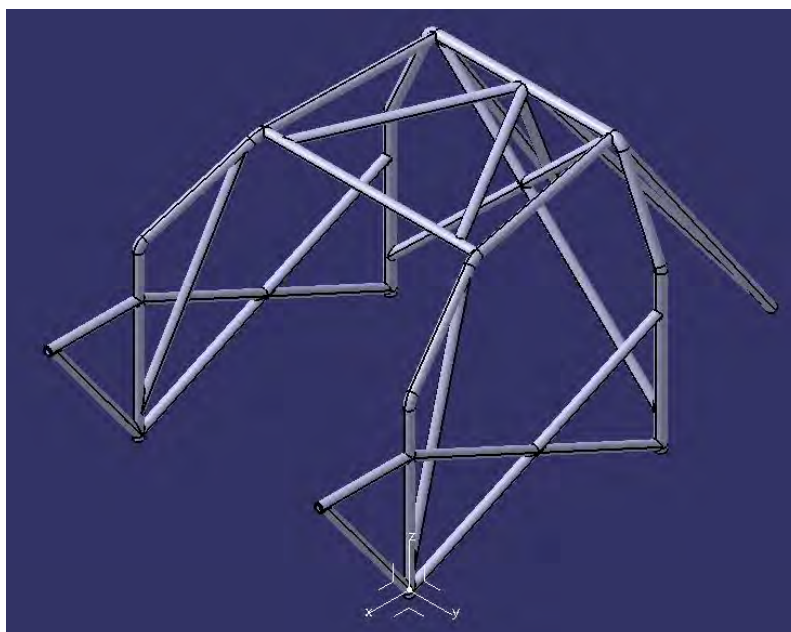
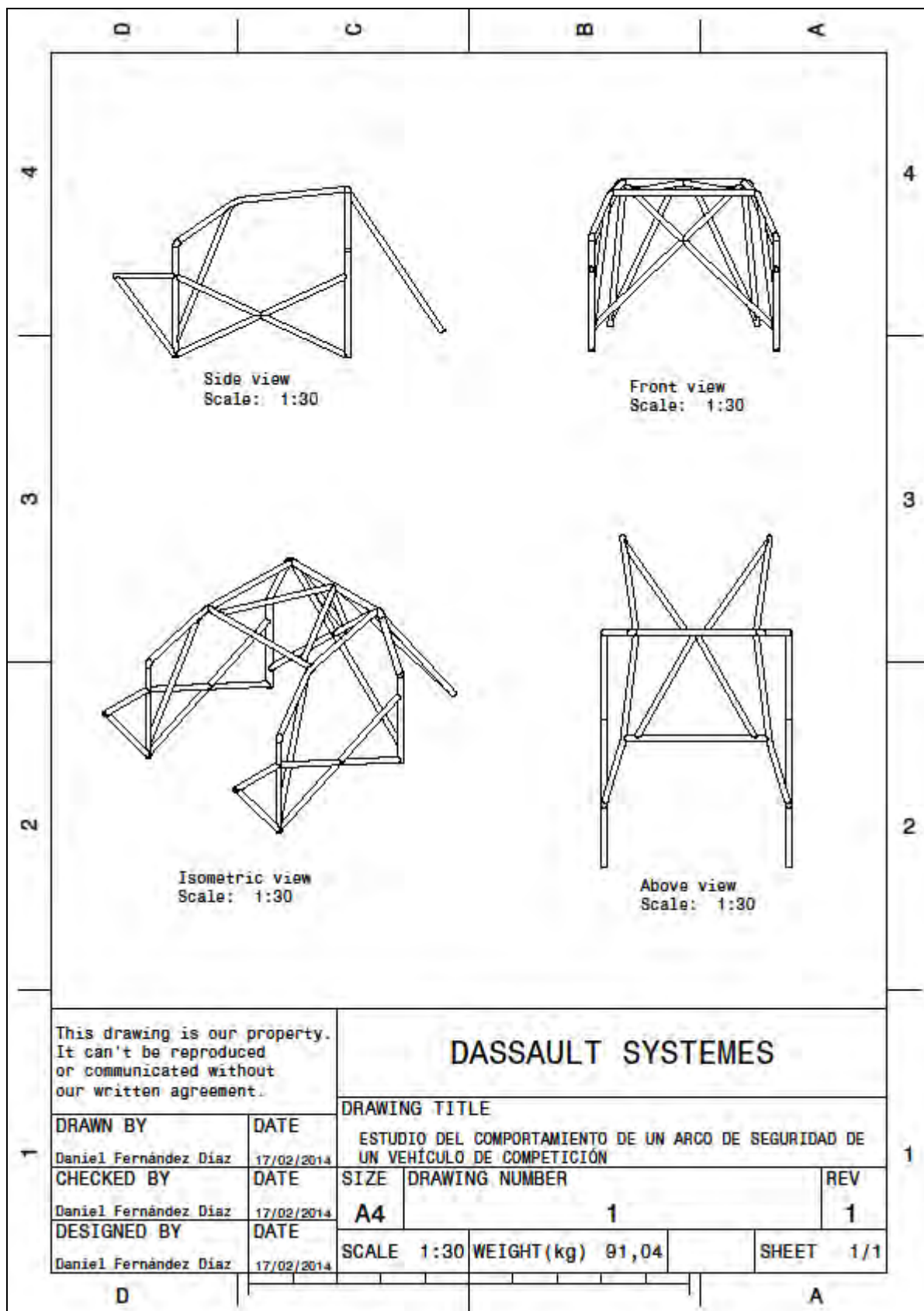


Ilustración 195 - Isométrico de la estructura final

A continuación se ha realizado con el módulo “Drafting” del programa “Catia” un plano de la estructura para utilizarlo a la hora de comercializar el producto. Se trata de un plano sin valores geométricos porque su función es ser orientativo a la hora de que las empresas o clientes sepan su distribución de barras y peso de la estructura.



## 9 PRESUPUESTO ECONÓMICO

Desde el punto de vista de la homologación se ha comprobado que la estructura es adecuada, pero también es conveniente realizar un estudio económico para poder comercializar el arco de seguridad dentro del mundo de la competición.

Para realizar un estudio económico se deben tener en cuenta tres grandes costes como son:

- **COSTE DE MATERIAL**

Para realizar el estudio de este apartado se ha obtenido la tabla 4 de la referencia bibliográfica [1], con los datos de precio para tubos de material 25CrMo4 con diámetro exterior 40 mm y espesor 4mm y para tubos del mismo material con diámetro exterior 45 mm y espesor 4 mm.

Tamaño (mm)	Peso por metro (Kg/m)	€/m
40 x 4	2,73	14,50
45 x 4	3,27	16,62

Tabla 4 - Precios de los materiales

Estos datos son aproximados porque ha resultado muy difícil encontrar proveedores de tubos con dicho material. Al final se ha optado por la página web de la referencia bibliográfica [1] para elegir los datos que aporta la tabla 4 haciendo una aproximación con el valor que tienen los tubos convencionales de dimensiones 40x2 y 45x2.

Para realizar el coste de material se necesitan los siguientes datos que se han obtenido del modelo de la estructura.

- Peso de la estructura total = 91,06 Kg
- Longitud de las barras del arco principal (45x4) = 3,2 m
- Longitud de las barras del resto de la estructura (40x4) = 24 m

Por lo tanto el coste de material de los tubos es **401,2 €**.

- **COSTE DE ESTUDIO**

Dentro de este coste se debe cuantificar el tiempo que ha empleado la persona encargada de realizar el modelo y el análisis de la estructura. Para ello se multiplica las horas trabajadas por la retribución económica que pide el ingeniero encargado del modelo.

Se supone que esta persona ha gastado 60 horas y cobra 40 euros la hora de trabajo. Por lo tanto el coste de estudio asciende a **2400 €**.

- **COSTE DE MANO DE OBRA**

En este coste se cuenta la cantidad económica que conlleva soldar todas las barras para formar la estructura final completa. Para ello se supone que hay un operario trabajando 10 horas y cobra la hora a 30 euros. Por lo tanto el coste de mano de obra conlleva una inversión de **300 €**.

Al final sumando todos los costes resulta que realizar el arco de seguridad descrito en el proyecto supone un coste económico de **3101,2 €**.

El precio que se ha obtenido para la estructura es una cantidad que deja poca rentabilidad para el fabricante, por lo tanto la idea es producir más conjuntos para que a lo largo del tiempo la estructura proporcione los mayores beneficios posibles. Si se reduce el coste de diseño a 600 euros, la amortización de dicho coste se consigue con la fabricación de al menos 4 arcos de seguridad. Por lo tanto se podrían comercializar las estructuras a **1301,2 €**.

Si se compara el arco de seguridad de la estructura final con uno que ya está en el mercado para el Renault Clio 2, como el que se indica en la ilustración 196 recopilado de la referencia bibliográfica [11], tiene un coste de 1249 €. Se puede observar que la estructura final de este proyecto se asemeja al precio de otros arcos ya comercializados, además con una distribución de barras similar, por lo que pueden ser igual de eficaces.



**Ilustración 196 - Ejemplo de un arco de seguridad para un Renault Clio 2**

Por lo tanto se concluye que el diseño final del arco de seguridad puede llegar a ser una competencia fuerte dentro de este mercado.

## 10 CONCLUSIONES

La principal conclusión que se puede obtener del proyecto es que gracias a los potentes programas de diseño 3D y a los encargados de realizar cálculos de elementos finitos las personas pueden realizar trabajos muy complejos con gran facilidad. No se necesitan realizar diseños reales para ver cómo resultaría el modelo de una estructura ni hacer pruebas reales para poder obtener resultados de cómo se comportaría un objeto a la hora de ensayarlo. La mayor parte de los proyectos de diseño y análisis pasan por un estudio previo donde se realizan los ensayos pertinentes con este tipo de software.

También es muy importante citar la facilidad que permite el artículo 253 – 2012 *“Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)”* del anexo A de la referencia bibliográfica [16] a la hora de hacerse una idea global del diseño de un arco de seguridad. Además el artículo siempre vela por la seguridad de los ocupantes del vehículo que al final es el objetivo del proyecto, es decir, diseñar y analizar un arco de seguridad para su futura homologación intentado que en ciertas circunstancias dentro de la competición el piloto y copiloto no sufran ningún tipo de daño.

Respecto los resultados obtenidos se pueden sacar varias conclusiones. La primera se centra en que para realizar un ensayo adecuado de un modelo se deben utilizar un tipo específico de elementos de diseño dependiendo del tipo de estructura que se quiera utilizar. Porque a la hora de analizar los resultados arrojados por los programas de elementos finitos cada tipo de elemento se aproxima más a los resultados ideales y reales. Por otro lado se ha podido observar como la incorporación de dos barras al diseño han sido la clave para que la estructura final cumpla todos los requisitos impuestos para su homologación. Si esas barras por el contrario se hubiesen colocado en otro sitio dentro de la estructura, es posible, que no hubiesen causado tal efecto en beneficio de la rigidez de la estructura que era de lo que se trataba. Es decir, si la estructura compuesta por las barras iniciales no soportaba las cargas impuestas había que rigidizar el diseño.

Por último se ha podido verificar que la estructura final elegida soporta los dos tipos de ensayos propuestos por la norma (referencia bibliográfica 14) porque se han comprobado con dos programas de elementos finitos diferentes. Por lo tanto se ha descartado que alguno de los dos programas trabajase erróneamente con el diseño empleado. Aunque ambos software trabajan de forma diferente porque se han introducido modelos con elementos de forma también distintos la estructura final queda aprobada.

## 11 TRABAJOS FUTUROS

A continuación se van a proponer trabajos futuros y complementarios al proyecto que se ha realizado.

- Realizar el diseño y análisis de las soldaduras entre barras en la estructura. Es interesante realizar este estudio porque como se ha observado en este proyecto las mayores tensiones se producían en dichas zonas de la estructura. Por lo general las estructuras se romperían por estas zonas al tener las mayores tensiones del modelo.
- Realizar el mismo estudio que se ha realizado en este proyecto con una estructura de seguridad que las uniones sean atornilladas en lugar de soldadas. Se estudiaría si la estructura se puede homologar según los análisis correspondientes y las restricciones determinadas para dicho estudio.
- Hacer un análisis dinámico del comportamiento de la estructura final en caso de accidente. En esta memoria se proporcionarían resultados de deformaciones de la estructura, estudiando si los ocupantes del vehículo sufrirían algún daño. Se podría realizar con diferentes tipos de accidente como por ejemplo, en caso de un accidente lateral, vuelco del coche, accidente con varias vueltas de campana, etc. En todos los casos el objetivo principal es ver cómo afecta al habitáculo interior del vehículo.
- Otro trabajo muy interesante sería el estudio a fatiga de la estructura en caso de ubicarse una fisura en una de las barras del conjunto. Sería un estudio por medio de vibraciones, en el cual se sabe que hay una fisura de unas dimensiones determinadas y suponiendo que a lo largo de un Gran Premio la carrocería sufre un número determinado de oscilaciones se calcularía si la estructura soportaría tal esfuerzo. También se podría saber cuánto tiempo la estructura sería óptima con un esfuerzo durante un tiempo determinado.
- Un trabajo muy interesante a la vez de complementario a este proyecto sería realizar el estudio de la estructura debido a su rigidez a la torsión. Con este estudio se podrían buscar soluciones para mejorar el paso por curva del vehículo, lo que supondría mejorar tiempo en un Gran Premio. Realizar este estudio puede variar la estructura final que se ha diseñado





en este proyecto, puesto que tanto el estudio por elementos finitos para la homologación de la estructura como el estudio de la rigidez a torsión de las barras van de la mano para realizar una estructura final competitiva y que a la vez cumpla todos los requisitos que impone la “Real Federación Española de Automovilismo”.

## 12 BIBLIOGRAFÍA

- [1] 25CrMo4. (s.f.). *Listado de precios de barras con material 25CrMo4*. Recuperado el Mayo de 2013, de Chasis Parts:  
[http://www.25crmo4.com/25crmo4\\_NE/25crmo4%20buizen\\_NL.htm](http://www.25crmo4.com/25crmo4_NE/25crmo4%20buizen_NL.htm)
- [2] Díaz, D. F. (Febrero de 2012). *Apuntes de Resistencia de Materiales de la Universidad Carlos III de Madrid*.
- [3] Engracor. (s.f.). *Características del material 25CrMo4*. Recuperado el Mayo de 2013, de Engracor: [http://www.engracor.com.ar/engracor/info\\_05.htm](http://www.engracor.com.ar/engracor/info_05.htm)
- [4] FIA. (s.f.). *ADVANCED HELMET TEST SPECIFICATION*. Recuperado el Julio de 2013, de FIA: <http://www.fia.com/sites/default/files/regulation/file/8860-2004%20FIA%20Advanced%20Helmet.pdf>
- [5] FIA. (s.f.). *FIA STANDARD FOR COMPETITION SEATS*. Recuperado el Julio de 2013, de FIA: [http://www.fia.com/sites/default/files/regulation/file/8855-1999\\_Competition\\_seat\\_0.pdf](http://www.fia.com/sites/default/files/regulation/file/8855-1999_Competition_seat_0.pdf)
- [6] FIA. (s.f.). *HANS SYSTEM*. Recuperado el Julio de 2013, de FIA: [http://www.fia.com/sites/default/files/regulation/file/11\\_FIA\\_Stand\\_8858\\_2002\\_Hans.pdf](http://www.fia.com/sites/default/files/regulation/file/11_FIA_Stand_8858_2002_Hans.pdf)
- [7] FIA. (s.f.). *Listado de normas según FIA*. Recuperado el Septiembre de 2013, de FIA: <http://www.fia.com/sport/homologation>
- [8] FIA. (s.f.). *NORME FIA POUR HARNAIS DE SECURITE*. Recuperado el Julio de 2013, de FIA: [http://www.fia.com/sites/default/files/regulation/file/8853-98\\_Harness\\_1.pdf](http://www.fia.com/sites/default/files/regulation/file/8853-98_Harness_1.pdf)
- [9] FIA. (s.f.). *PROTECTIVE CLOTHING FOR AUTOMOBILE DRIVERS*. Recuperado el Julio de 2013, de FIA: [http://www.fia.com/sites/default/files/regulation/file/8856-2000\\_overalls.pdf](http://www.fia.com/sites/default/files/regulation/file/8856-2000_overalls.pdf)
- [10] Ibagué, U. d., & Cubillos, A. (s.f.). *Introducción al método de los elementos finitos*. Recuperado el Noviembre de 2013, de Wordpress:  
<http://almec.files.wordpress.com/2007/10/resumen.pdf>
- [11] Motosport, M. (s.f.). *Ejemplos de arcos de seguridad para Renault Clio 2*. Recuperado el Enero de 2014, de Marco Racing: <http://www.marcoracing.com/seguridad/arcos-de-seguridad-OMP-multipunto.asp?para=Renault>
- [12] OMP. (s.f.). *Ejemplo de arco de seguridad con material 25Crmo4*. Recuperado el Mayo de 2013, de OMP Racing:  
<http://www.ompracing.it/detail.html?productcode=AB/106/...A>

- [13] OMP. (s.f.). *Ejemplo de arco de seguridad con material 25CrMo4*. Recuperado el Mayo de 2013, de OMP Racing:  
<http://www.ompracing.it/detail.html?productcode=AB/106/...B>
- [14] RFEdA, D. T. (s.f.). *Estructuras de seguridad*. Recuperado el Mayo de 2013, de RFDEA:  
<http://www.rfeda.es/docs/noticias/restringido/normasbarra.pdf>
- [15] Sumiteccr. (s.f.). *Propiedades y composición del material 25CrMo4*. Recuperado el Mayo de 2013, de Sumiteccr:  
<http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%204140.pdf>
- [16] Técnico, F. S. (s.f.). *Artículo 253-2013 Equipamiento de seguridad (Grupos N, A)*. Recuperado el Marzo de 2013, de RFEDA:  
[http://www.rfeda.es/docs/dpto\\_tecnico/2013/art253\\_esp.pdf](http://www.rfeda.es/docs/dpto_tecnico/2013/art253_esp.pdf)
- [17] UTP. (s.f.). *Nomenclatura de aceros*. Recuperado el Mayo de 2013, de UTP:  
[http://www.utp.edu.co/~publio17/ac\\_aleados.htm](http://www.utp.edu.co/~publio17/ac_aleados.htm)
- [18] Wikipedia. (s.f.). *Rally*. Recuperado el Octubre de 2013, de Wikipedia:  
<http://es.wikipedia.org/wiki/Rally>

## ANEXO A: Artículo 253 – 2012“Equipamiento de Seguridad (Grupo N, A)”, referencia bibliográfica [16]

FIA

Anexo J / Appendix J – Art.253

### ARTÍCULO 8: ESTRUCTURA DE SEGURIDAD

#### 8.1 Generalidades:

La instalación de una estructura de seguridad es obligatoria.  
Puede estar:

- a) Fabricada de acuerdo a los requerimientos de los artículos siguientes;
- b) Homologada o certificada por una ADN de acuerdo a los reglamentos de homologación para estructuras de seguridad;

Se debe presentar a los Comisarios Técnicos de la prueba una copia original del documento o certificado de homologación aprobado por la ADN y firmado por técnicos cualificados que representen al fabricante.

Toda nueva estructura de seguridad homologada por una ADN y vendida a partir del 01/01/2003, deberá estar identificada, de forma individual, por una placa de identificación colocada por el constructor que no pueda copiarse ni retirarse (es decir, soldada, troquelada o un adhesivo auto destructible).

La placa de identificación debe portar el nombre del constructor, el número de homologación de la ADN y el número de serie único del fabricante.

Deberá llevarse a bordo un certificado mostrando los mismos números identificativos y presentarse a los comisarios técnicos de la prueba.

- c) Homologada por la FIA de acuerdo a los reglamentos de homologación para estructuras de seguridad.

Esta estructura de seguridad debe ser objeto de una extensión (VO) de la ficha de homologación del vehículo homologado por la FIA.

La identificación del fabricante y un número de serie debe ser claramente visible en todas las estructuras homologadas y vendidas desde el 1 de enero de 1997.

La ficha de homologación de la estructura debe especificar cómo y dónde se indica esta información, y los compradores deben recibir un certificado numerado correspondiente a la misma.

Para los siguientes vehículos, la estructura de seguridad debe estar homologada por FIA:

Variante Kit Súper 1600, Variante Kit Súper 2000, Variante Kit Súper 2000 Rallye, Variante World Rallye Car.

Toda modificación de una estructura de seguridad homologada o certificada está prohibida.

Será considerado como modificación cualquier proceso sobre la estructura por medio de mecanizado o soldadura que implique una modificación permanente del material o de la estructura de seguridad.

Cualquier reparación de una estructura de seguridad dañada tras un accidente debe llevarse a cabo por el fabricante de la estructura o con su aprobación.

Los tubos de las estructuras de seguridad no deben transportar fluidos ni ninguna otra cosa.

Las estructuras de seguridad no deben dificultar la entrada o salida del piloto y copiloto.

Los elementos de la estructura podrán ocupar el espacio de los ocupantes atravesando el salpicadero y los revestimientos delanteros, así como el asiento y revestimientos traseros.

Los asientos traseros pueden plegarse.

#### 8.2 Definiciones:

##### 8.2.1 Estructura de seguridad:

Estructura multitubular instalada en el habitáculo cerca de la carrocería, concebida con el fin de evitar una deformación importante de la carrocería (chasis) en caso de accidente.

##### 8.2.2 Arco de seguridad:

Estructura tubular formando un arco con dos bases de anclaje.

##### 8.2.3 Arco principal (dibujo 253-1):

Estructura prácticamente vertical constituida por un arco tubular de una sola pieza (Inclinación máxima  $\pm 10^\circ$  con respecto a la vertical) situado en un plano transversal al vehículo, e inmediatamente detrás de los asientos delanteros.

**El eje del tubo debe estar contenido en un solo plano.**

##### 8.2.4 Arco delantero (dibujo 253-1):

Similar al arco principal pero su forma sigue los montantes y el borde superior del parabrisas.

##### 8.2.5 Arco lateral (dibujo 253-2):

Estructura casi longitudinal y prácticamente vertical constituida por un arco tubular de una sola pieza, situado a lo largo de la parte derecha o izquierda del vehículo, siguiendo el pilar delantero del mismo el montante del parabrisas, y los montantes traseros siendo casi verticales y estando justo detrás de los asientos

### ARTICLE 8: SAFETY CAGES

#### 8.1 General:

The fitting of a safety cage is compulsory.  
It may be either:

- a) Fabricated in compliance with the requirements of the following articles;
- b) Homologated or Certified by an ASN according to the homologation regulations for safety cages;

An authentic copy of the homologation document or certificate, approved by the ASN and signed by qualified technicians representing the manufacturer, must be presented to the event's scrutineers.

Any new cage which is homologated by an ASN and is on sale, as from 01.01.2003, must be identified by means of an identification plate affixed to it by the manufacturer; this identification plate must be neither copied nor moved (i.e. embedded, engraved or self-destructing sticker).

The identification plate must bear the name of the manufacturer, the homologation or certification number of the ASN homologation form or certificate and the individual series number of the manufacturer.

A certificate bearing the same numbers must be carried on board and be presented to the event's scrutineers.

- c) Homologated by the FIA according to the homologation regulations for safety cages.

It must be the subject of an extension (VO) to the homologation form of the vehicle homologated by the FIA.

The manufacturer's identification and a series number must be clearly visible on all cages homologated and sold after 01.01.1997.

The homologation form of the cage must specify how and where this information is indicated, and the purchasers must receive a numbered certificate corresponding to this.

For the following cars, the cage must compulsorily be homologated by the FIA:

Super 1600 Kit Variant, Super 2000 Kit Variant, Super 2000 Rally Kit Variant, World Rally Car Variant.

Any modification to a homologated or certified safety cage is forbidden.

To be considered as a modification, any process made to the cage by machining, welding, that involves a permanent modification of the material or the safety cage.

All repairs to a homologated or certified safety cage, damaged after an accident must be carried out by the manufacturer of the rollcage or with his approval.

Tubes must not carry fluids or any other item.

The safety cage must not unduly impede the entry or exit of the driver and co-driver.

Members may intrude into the occupant's space in passing through the dashboard and trim, as well as through the rear seats.

The rear seat may be folded down.

#### 8.2 Definitions:

##### 8.2.1 Safety cage:

Multi-tubular structure installed in the cockpit and fitted close to the bodyshell, the function of which is to reduce the deformation of the bodyshell (chassis) in case of an impact.

##### 8.2.2 Rollbar:

Tubular frame forming a hoop with two mounting feet.

##### 8.2.3 Main rollbar (drawing 253-1):

Transversal and near-vertical (maximum angle  $\pm 10^\circ$  to the vertical) single piece tubular hoop located across the vehicle just behind the front seats.

**The tube axis must be within one single plane.**

##### 8.2.4 Front rollbar (drawing 253-1):

Similar to main rollbar but its shape follows the windscreen pillars and top screen edge.

##### 8.2.5 Lateral rollbar (drawing 253-2):

Near-longitudinal and near-vertical single piece tubular hoop located along the right or left side of the vehicle, the front pillar of which follows the windscreen pillar and the rear pillar of which is near-vertical and located just behind the front seats.



delanteros.

**El montante trasero debe ser rectilíneo en vista lateral.**

**8.2.6 Semiarco lateral (dibujo 253-3):**

Idéntico al arco lateral pero sin el pilar trasero.

**8.2.7 Tirante longitudinal:**

Tubo casi longitudinal de una única pieza uniendo las partes superiores del arco principal y delantero.

**8.2.8 Tirante transversal:**

Tubo semi-transversal de una única pieza que une los miembros superiores de los arcos o semiarcos laterales.

**8.2.9 Tirante diagonal:**

Tubo transversal que une uno de los ángulos superiores del arco principal o uno de los extremos del miembro transversal en el caso de un arco lateral, y el pie de anclaje opuesto inferior del arco

o  
El extremo superior de un tirante trasero con el punto de anclaje inferior del otro tirante trasero.

**8.2.10 Tirantes desmontables:**

Miembros estructurales de una estructura de seguridad que se pueden desmontar.

**8.2.11 Refuerzo de la estructura:**

Miembro añadido a la estructura de seguridad para mejorar su resistencia.

**8.2.12 Pie de anclaje:**

Placa soldada al final de un tubo de la estructura para permitir su atornillado y/o soldadura sobre la carrocería/chasis, generalmente sobre una placa de refuerzo.

**8.2.13 Placa de refuerzo:**

Placa metálica fijada a la carrocería/chasis bajo el pie de anclaje de un arco para repartir mejor la carga sobre la carrocería/chasis.

**8.2.14 Cartela (Dibujo 253-34):**

Refuerzo para un ángulo o unión hecho de chapa doblada en forma de U (dibujo 253-34) de espesor no inferior a 1,0 mm.

Los extremos de dicha **cartela (punto E)** deben estar situados a una distancia del punto superior del ángulo (**punto S**) de 2 a 4 veces el diámetro **exterior** del tubo mayor de los unidos.

**The rear pillar must be straight in side view.**

**8.2.6 Lateral half-rollbar (drawing 253-3):**

Identical to the lateral rollbar but without the rear pillar.

**8.2.7 Longitudinal member:**

Near-longitudinal single piece tube joining the upper parts of the front and main rollbars.

**8.2.8 Transversal member:**

Near-transversal single piece tube joining the upper parts of the lateral half-rollbars or of the lateral rollbars.

**8.2.9 Diagonal member:**

Transversal tube between:

One of the top corners of the main rollbar, or one of the ends of the transversal member in the case of a lateral rollbar, and a the lower mounting point on the opposite side of the rollbar.

or  
The upper end of a backstay and the lower mounting point of the other backstay.

**8.2.10 Removable members:**

Members of a safety cage which must be able to be removed.

**8.2.11 Cage reinforcement:**

Member added to the safety cage to improve its strength.

**8.2.12 Mounting foot:**

Plate welded to the end of a rollbar tube to permit its bolting and/or welding to the bodyshell/chassis, usually onto a reinforcement plate.

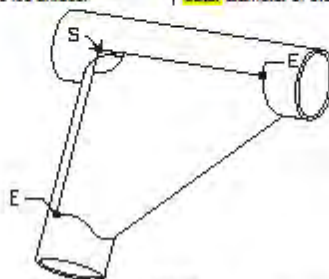
**8.2.13 Reinforcement plate:**

Metal plate fixed to the bodyshell/chassis under a rollbar mounting foot to better spread the load onto the bodyshell/chassis.

**8.2.14 Gusset (Drawing 253-34):**

Reinforcement for a bend or junction made from bent sheet metal with a U shape (drawing 253-34) the thickness of which must not be less than 1.0 mm.

The ends of this **gusset (point E)** must be situated at a distance from the top of the angle (**point S**) of between 2 to 4 times the **outer** diameter of the biggest of the tubes joined.



### 8.3 Especificaciones

#### 8.3.1 Estructura básica

La estructura básica debe estar realizada de acuerdo a uno de los diseños siguientes:

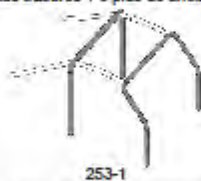
1 arco principal + 1 arco delantero + 2 miembros longitudinales + 2 tirantes traseros + 6 pies de anclaje (dibujo 253-1)

o

2 arcos laterales + 2 miembros transversales + 2 tirantes traseros + 6 pies de anclaje (ver dibujo 253-2)

o

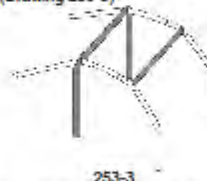
1 arco principal + 2 semiarcos laterales + 1 miembro transversal + 2 tirantes traseros + 6 pies de anclaje (ver dibujo 253-3)



253-1



253-2



253-3

La parte vertical del arco principal debe ser tan recta como sea posible y estar lo más próxima al contorno interior de la carrocería, y tener una sola curvatura en su parte vertical inferior.

### 8.3 Specifications

#### 8.3.1 Basic structure

The basic structure must be made according to one of the following designs:

\* 1 main rollbar + 1 front rollbar + 2 longitudinal members + 2 backstays + 6 mounting feet (drawing 253-1)

or

\* 2 lateral rollbars + 2 transversal members + 2 backstays + 6 mounting feet (drawing 253-2)

or

\* 1 main rollbar + 2 lateral half-rollbars + 1 transversal member + 2 backstays + 6 mounting feet (Drawing 253-3)

The vertical part of the main rollbar must be as close as possible to the interior contour of the bodyshell and must have only one bend with its lower vertical part.



El montante delantero de un arco delantero o de un arco lateral debe seguir los montantes del parabrisas lo más cerca posible y tener una sola curvatura en su parte vertical inferior.

De cara a fabricar la estructura de seguridad, las conexiones de los miembros transversales de los arcos laterales, las conexiones de los miembros longitudinales al arco principal y delantero, así como la conexión de un semilarco lateral al arco principal, deben estar situadas al nivel del techo.

En cualquier caso, no debe haber más de 4 uniones desmontables a nivel del techo.

Los tirantes longitudinales traseros deben anclarse cerca del techo y cerca de los ángulos superiores exteriores del arco principal a ambos lados del vehículo, permitiéndose por medio de conexiones desmontables.

Deberán formar un ángulo mínimo de 30° con la vertical y estar dirigidos hacia atrás, serán rectos y tan cercanos como sea posible a los paneles interiores laterales de la carrocería.

#### 8.3.2 Diseño:

Una vez que la estructura básica está definida, debe ser completada con miembros y refuerzos obligatorios (ver artículo 253-8.3.2.1), a los cuales se podrán añadir miembros y refuerzos opcionales (ver artículo 253-8.3.2.2).

Salvo que esté explícitamente permitido y salvo que se usen uniones desmontables de acuerdo al Artículo 253-8.3.2.4, todos los elementos y refuerzos tubulares deben ser de una única pieza.

##### 8.3.2.1 Tirantes y refuerzos obligatorios:

###### 8.3.2.1.1 Tirante diagonal:

Vehículos homologados antes del 01/01/2002:

La estructura debe incorporar uno de los tirantes diagonales definidos por los dibujos 253-4, 253-5 y 253-6. La orientación de la diagonal puede invertirse.

En el caso del dibujo 253-6, la distancia entre los dos anclajes de la carrocería/chasis no debe ser superior a 300 mm.

Los miembros deben ser rectos y pueden ser desmontables.

El extremo superior de la diagonal debe unirse al arco principal a menos de 100 mm de la unión del arco principal con el tirante longitudinal trasero, o al tirante longitudinal trasero a menos de 100 mm de su unión con el arco principal (ver dibujo 253-52 para las medidas).

El extremo inferior de la diagonal debe unirse al arco principal o a un tirante longitudinal trasero a menos de 100 mm del pie de anclaje (excepto para el caso del dibujo 253-6).

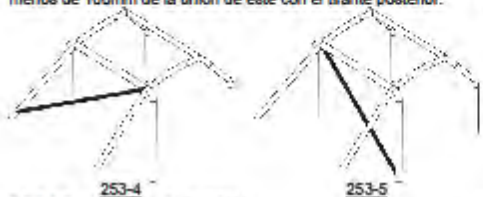
Vehículos homologados desde el 01/01/2002:

La estructura debe tener dos miembros diagonales en el arco principal de acuerdo al dibujo 253-7.

Los miembros deben ser rectos y pueden ser desmontables.

El extremo inferior de la diagonal debe unirse con el arco principal o con el tirante trasero a menos de 100 mm del pie de anclaje (ver dibujo 253-52 para las medidas).

El extremo superior de la diagonal debe unirse al arco principal a menos de 100 mm de la unión de este con el tirante posterior.



##### 8.3.2.1.2 Tirantes de puertas:

Se deberán montar uno o varios tirantes longitudinales a cada lado del vehículo de acuerdo a los dibujos 253-8, 253-9, 253-10 y 253-11 (dibujos 253-9, 253-10 y 253-11 para vehículos homologados a partir de 01-01-2007).

Los dibujos se pueden combinar.

El diseño debe ser idéntico en ambos lados.

Podrán ser desmontables.

La protección lateral estará situada tan alta como sea posible pero sus puntos de anclaje superiores no estarán a más de la mitad de la altura total de la puerta medida desde su base.

Si estos puntos de anclaje superiores están situados delante o detrás de la apertura de la puerta, esta limitación de altura es también válida para la intersección correspondiente al tirante y la apertura de la puerta.

En el caso de una protección en "X" (dibujo 253-9), es aconsejable que los puntos de anclaje inferiores se fijen

The front pillar of a front rollover or of a lateral rollover must follow the windscreen pillars as closely as possible and have only one bend with its lower vertical part.

In order to build the safety cage, the connections of the transversal members to the lateral rollbars, the connections of the longitudinal members to the front and main rollbars, as well as the connection of a semi-lateral rollover to the main rollover must be situated at the roof level.

In all cases, there must not be more than 4 removable connections at the roof level.

The backstays must be attached near the roofline and near the top outer bends of the main rollbar, on both sides of the car, possibly by means of removable connections.

They must form an angle of at least 30° with the vertical, must run rearwards and be straight and as close as possible to the interior side panels of the bodyshell.

#### 8.3.2 Design:

Once the basic structure is defined, it must be completed with compulsory members and reinforcements (see article 253-8.3.2.1), to which optional members and reinforcements may be added (see article 253-8.3.2.2).

Unless explicitly permitted and unless dismantlable joints are used in compliance with Article 253-8.3.2.4, all members and tubular reinforcements must be single pieces.

##### 8.3.2.1 Compulsory members and reinforcements:

###### 8.3.2.1.1 Diagonal member:

Cars homologated before 01/01/2002:

The cage must have one of the diagonal members defined by Drawings 253-4, 253-5, 253-6. The orientation of the diagonal may be reversed.

In the case of Drawing 253-6, the distance between the two mountings on the bodyshell/chassis must not be greater than 300mm.

Members must be straight and may be removable.

The upper end of the diagonal must join the main rollbar no further than 100 mm from its junction with the backstay, or the backstay no more than 100 mm from its junction with the main rollbar (see Drawing 253-52 for the measurement).

The lower end of the diagonal must join the main rollbar or the backstay no further than 100 mm from the mounting foot (except for the case of Drawing 253-6).

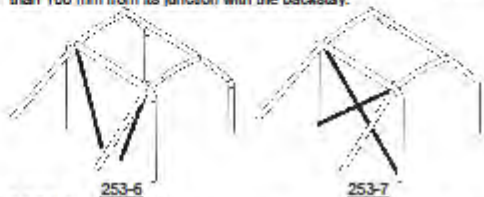
Cars homologated as from 01/01/2002:

The cage must have two diagonal members on the main rollbar according to Drawing 253-7.

Members must be straight and may be removable.

The lower end of the diagonal must join the main rollbar no further than 100 mm from the mounting foot (see Drawing 253-52 for the measurement).

The upper end of the diagonal must join the main rollbar no further than 100 mm from its junction with the backstay.



##### 8.3.2.1.2 Doorbars:

One or more longitudinal members must be fitted at each side of the vehicle according to Drawings 253-8, 253-9, 253-10 and 253-11 (Drawings 253-9, 253-10 and 253-11 for cars homologated as from 01/01/2007).

Drawings may be combined.

The design must be identical on both sides.

They may be removable.

The side protection must be as high as possible, but its upper attachment point must not be higher than half the height of the door opening measured from its base.

If these upper attachment points are located in front of or behind the door opening, this height limitation is also valid for the corresponding intersection of the strut and the door opening.

In the case of doorbars in the form of an "X" (Drawing 253-9), it is recommended that the lower attachment points of the cross-struts



directamente sobre el larguero longitudinal de la carrocería (chasis) y que al menos una parte de la "X" sea una barra de una sola pieza.

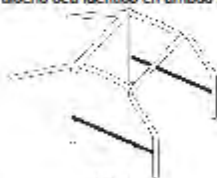
La conexión de los tirantes de puertas con el pilar de refuerzo del parabrisas (dibujo 253-15) está autorizada.

Para competiciones sin copiloto, dichos miembros pueden ser montados sólo en el lado del conductor y no es obligatorio que el diseño sea idéntico en ambos lados.

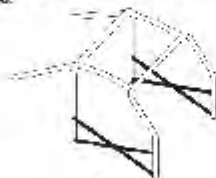
be fixed directly onto the longitudinal member of the bodyshell/chassis and that at least one part of the "X" be a single-piece bar.

The connection of the doorbars to the windscreen pillar reinforcement (Drawing 253-15) is authorised.

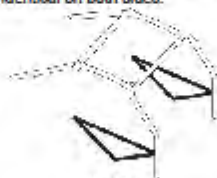
For competitions without co-driver, members may be fitted on the driver's side only and it is not compulsory for the design to be identical on both sides.



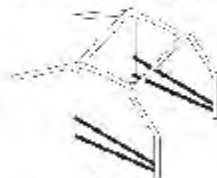
253-8



253-9



253-10



253-11

#### 8.3.2.1.3 Elementos de refuerzo de techo:

Únicamente vehículos homologados desde el 01/01/2005:

La parte superior de la estructura de seguridad debe cumplir con los dibujos 253-12, 253-13 y 253-14.

Los refuerzos pueden seguir la curvatura del techo.

Para competiciones sin copiloto, en el caso del dibujo 253-12 solamente, puede montarse un solo refuerzo pero su conexión delantera debe estar situada del lado del piloto.

Los extremos de los refuerzos deben estar a menos de 100mm de la unión entre arcos y miembros (esto no será de aplicación para la punta de la V formada por los refuerzos en los dibujos 253-13 y 253-14).

#### 8.3.2.1.3 Roof reinforcement:

Cars homologated as from 01.01.2005 only:

The upper part of the safety cage must comply with one of Drawings 253-12, 253-13 and 253-14.

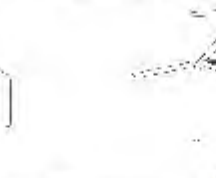
The reinforcements may follow the curve of the roof.

For competitions without co-drivers, in the case of Drawing 253-12 only, only one diagonal member may be fitted but its front connection must be on the driver's side.

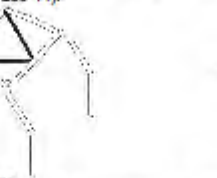
The ends of the reinforcements must be less than 100 mm from the junction between rollbars and members (not applicable to the top of the V formed by reinforcements in Drawings 253-13 and 253-14).



253-12



253-13



253-14

#### 8.3.2.1.4 Pilar de refuerzo del parabrisas:

Únicamente vehículos homologados desde el 01/01/2006:

Deben estar montados a cada lado del arco delantero si la dimensión "A" es superior a 200mm (ver dibujo 253-15).

Este refuerzo puede ser curvado a condición de que sea rectilíneo en vista lateral y que el ángulo de la curvatura no exceda 20°.

Su extremo superior debe estar a menos de 100mm de la unión entre el arco delantero (lateral) y el miembro longitudinal (transversal) (ver dibujo 253-52 para las medidas).

Su extremo inferior debe estar a menos de 100mm del pie de anclaje del arco (el pie de anclaje delantero en caso de arco lateral).

#### 8.3.2.1.4 Windscreen pillar reinforcement:

Cars homologated as from 01.01.2006 only:

It must be fitted on each side of the front rollbar if dimension "A" is greater than 200 mm (Drawing 253-15).

It may be bent on condition that it is straight in side view and that the angle of the bend does not exceed 20°.

Its upper end must be less than 100 mm from the junction between the front (lateral) rollbar and the longitudinal (transversal) member (see Drawing 253-52 for the measurement).

Its lower end must be less than 100 mm from the (front) mounting foot of front (lateral) rollbar.



253-15

#### 8.3.2.1.5 Refuerzo de ángulos y uniones:

Las uniones entre:

- los miembros diagonales del arco principal,

- los refuerzos del techo (configuración según dibujo 253-12 y sólo

para vehículos homologados a partir de 01/01/2007),

- los tirantes de las puertas (configuración del dibujo 253-9),

- los tirantes de las puertas y los pilares de refuerzo del parabrisas (dibujo 253-15), deben estar reforzados por un mínimo de dos

cartelas de acuerdo con el artículo 253-8.2.14.

Si los tirantes de las puertas y el pilar de refuerzo del parabrisas no están situados en el mismo plano, el refuerzo debe estar fabricado en chapa de acero, siempre que cumpla con las

dimensiones del art. 253-8.2.14.

#### 8.3.2.2 Tirantes y refuerzos opcionales:

#### 8.3.2.1.5 Reinforcement of bends and junctions:

The junctions between:

- the diagonal members of the main rollbar,

- the roof reinforcements (configuration of Drawing 253-12 and only for cars homologated as from 01.01.2007),

- the doorbars (configuration of Drawing 253-9),

- the doorbars and the windscreen pillar reinforcement (Drawing 253-15), must be reinforced by a minimum of 2 gussets complying with article 253-8.2.14.

If the doorbars and the windscreen pillar reinforcement are not situated in the same plane, the reinforcement may be made of fabricated sheet metal, provided it complies with dimensions in Article 253-8.2.14.

#### 8.3.2.2 Optional members and reinforcements:

Excepto otras indicaciones dadas en el artículo 253-8.3.2.1, los miembros y refuerzos mostrados en los dibujos 253-12 a 253-21 y 253-23 a 253-33, son opcionales y pueden ser instalados a voluntad del fabricante.

Deben estar o bien soldados o bien instalados mediante conexiones desmontables.

Todos los tirantes y refuerzos mencionados anteriormente pueden utilizarse por separado o combinados entre sí.

**8.3.2.2.1 Refuerzo de techo (dibujos 253-12 a 253-14):**  
Opcionales únicamente para los vehículos homologados antes del 01/01/2005.

Para competiciones sin copiloto, en el caso del dibujo 253-12 solamente, puede montarse un solo refuerzo pero su conexión delantera debe estar situada del lado del piloto.

**8.3.2.2.2 Pilar de refuerzo del parabrisas (dibujo 253-15):**  
Opcional únicamente para los vehículos homologados antes del 01/01/2005.

Este refuerzo puede ser curvado a condición de que sea rectilíneo en vista lateral y que el ángulo de la curvatura no exceda 20°.

**8.3.2.2.3 Diagonales entre los tirantes traseros (dibujo 253-21):**

La configuración del dibujo 253-21 puede ser reemplazada por la del dibujo 253-22, en el caso de que se instale un refuerzo en el techo de acuerdo con el dibujo 253-14.

**8.3.2.2.4 Refuerzos de anclaje sobre la suspensión delantera (dibujo 253-25):**

Los refuerzos deben estar conectados a los puntos de anclaje superiores de la suspensión.

**8.3.2.2.5 Miembros transversales (dibujos 253-26 a 253-30):**  
Los miembros transversales montados sobre el arco principal o entre los tirantes traseros pueden usarse para los anclajes de los arneses de seguridad, conforme al art. 253-6.2 (prohibida la utilización de conexiones desmontables).

Para los miembros mostrados en los dibujos 253-26 a 253-27, el ángulo entre el brazo central y el vertical debe ser de al menos 30°.

El miembro transversal fijado al arco delantero no debe invadir el espacio reservado para los ocupantes.

Debe estar situado tan alto como sea posible, pero su borde inferior no debe estar situado por encima del punto más elevado del salpicadero.

Para vehículos homologados a partir del 01/01/2007, no debe posicionarse por debajo de la columna de dirección.

**8.3.2.2.6 Refuerzos de ángulo y unión (dibujos 253-31 a 253-34):**

Los refuerzos deben estar hechos de tubos o chapa curvada en forma de U cumpliendo con el art. 253-6.2.14.

El espesor de los elementos que formen un refuerzo no debe ser menor de 1,0 mm.

Los extremos de las barras de refuerzo no deben situarse a más distancia de la mitad de la longitud del miembro al que van unidos, a excepción de aquellos del arco delantero, que pueden unirse a las barras de refuerzo de las puertas y el arco delantero.

Except other indications given in article 253-8.3.2.1, members and reinforcements shown in Drawings 253-12 to 253-21 and 253-23 to 253-33 are optional and may be installed as desired by the constructor.

They must be either welded or installed by means of dismantable joints.

All members and reinforcements mentioned above may be used separately or combined with one another.

**8.3.2.2.1 Roof reinforcements (Drawings 253-12 to 253-14):**  
Optional only for cars homologated before 01.01.2005.

For competitions without co-drivers, in the case of Drawing 253-12 only, one diagonal member only may be fitted but its front connection must be on the driver's side.

**8.3.2.2.2 Windscreen pillar reinforcement (Drawing 253-15):**  
Optional only for cars homologated before 01.01.2005.

It may be bent on condition that it is straight in side view and that the angle of the bend does not exceed 20°.

**8.3.2.2.3 Backstay diagonals (Drawing 253-21):**

The configuration of Drawing 253-21 may be replaced with that of Drawing 253-22 if a roof reinforcement complying with Drawing 253-14 is used.

**8.3.2.2.4 Front suspension mounting points (Drawing 253-25):**

The extensions must be connected to the front suspension top mounting points.

**8.3.2.2.5 Transversal members (Drawing 253-26 to 253-30):**  
Transversal members fitted on the main rollbar or between the backstays may be used for the safety harness mountings in accordance with Article 253-6.2 (use of dismantable joints prohibited).

For members shown on Drawings 253-26 and 253-27, the angle between the central leg and the vertical must be at least 30°.

The transversal member fixed to the front rollbar must not encroach upon the space reserved for the occupants.

It may be placed as high as possible but its lower edge must not be higher than the uppermost point of the dashboard.

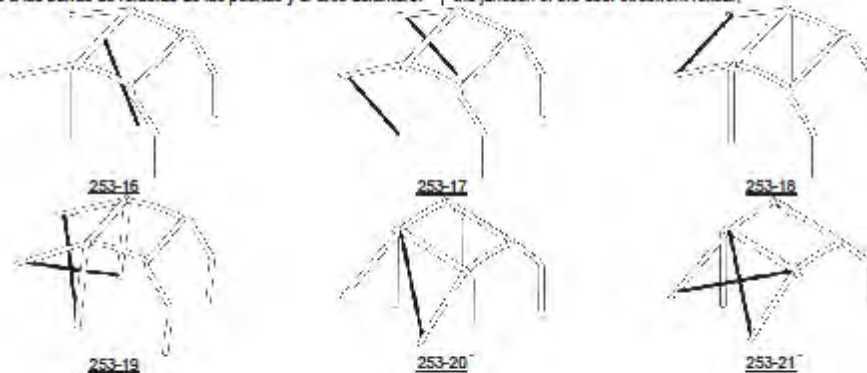
For cars homologated as from 01.01.2007, it must not be positioned below the steering column.

**8.3.2.2.6 Reinforcement of bends or junctions (Drawings 253-31 to 253-34):**

Reinforcements must be made of tubes or bent-sheet metal with U shape complying with article 253-6.2.14.

The thickness of the components forming a reinforcement must not be less than 1.0 mm.

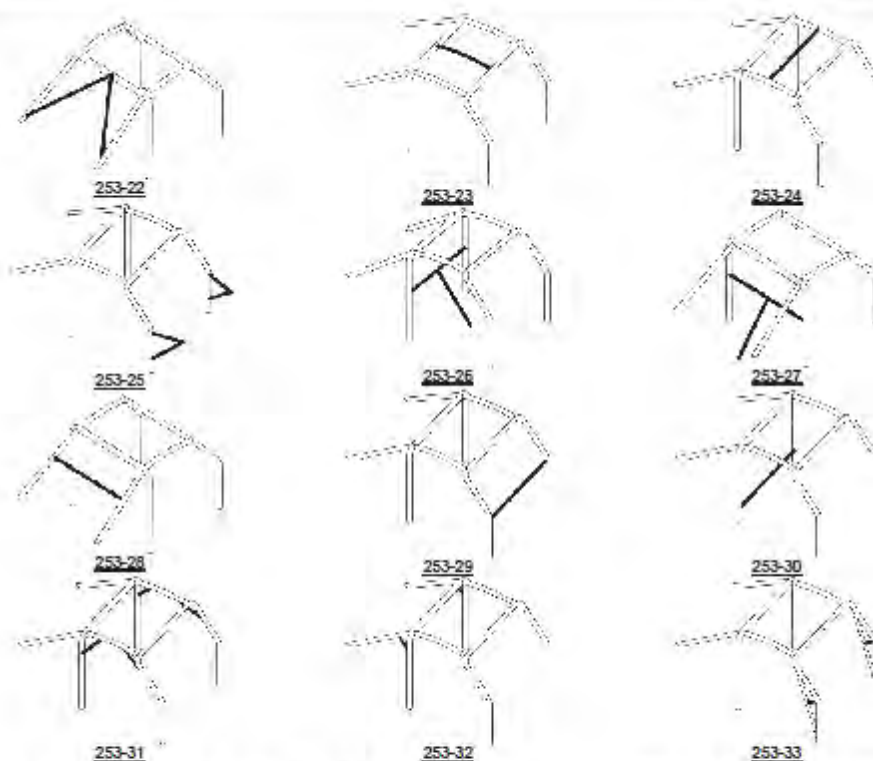
The ends of the tubular reinforcements must not be more than half way down or along the members to which they are attached, except for those of the junction of the front rollbar, which may join the junction of the door strut/front rollbar.





FIA

Anexo J / Appendix J – Art.253



8.3.2.3 Configuración mínima de la estructura de seguridad: La configuración mínima de la estructura de seguridad se define como sigue:

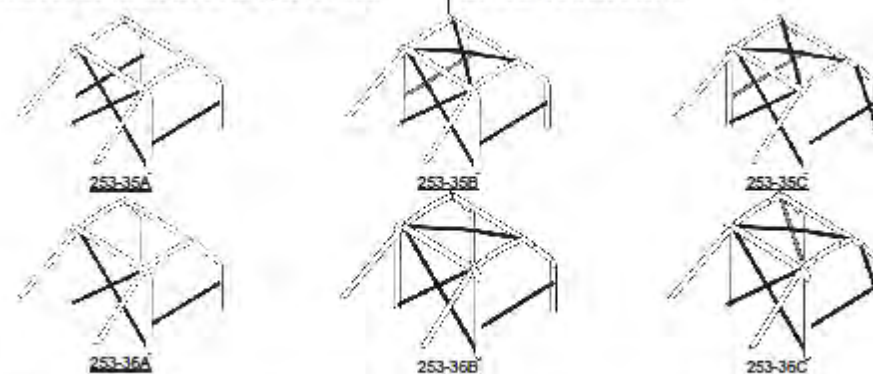
Vehículos Homologados en	Con copiloto	Sin copiloto
entre el 01.01.2002 y el 31.12.2004	Dibujo 253-35A	Dibujo 253-36A o simétrico
entre el 01.01.2005 y el 31.12.2005	Dibujo 253-35B	Dibujo 253-36B o simétrico
A partir del 01.01.2006	Dibujo 253-35C	Dibujo 253-36C o simétrico

Las barras de las puertas y los refuerzos del techo pueden variar de acuerdo con los artículos 253-8.3.2.1.2 y 253-8.3.2.1.3.

8.3.2.3 Minimum configuration of the safety cage: The minimum configuration of a safety cage is defined as follows:

Cars homologated	With co-driver	Without co-driver
between 01.01.2002 and 31.12.2004	Drawing 253-35A	Drawing 253-36A or symmetrical
between 01.01.2005 and 31.12.2005	Drawing 253-35B	Drawing 253-36B or symmetrical
as from 01.01.2006	Drawing 253-35C	Drawing 253-36C or symmetrical

Doorbars and roof reinforcement may vary according to articles 253-8.3.2.1.2 and 253-8.3.2.1.3.



FIA Sport / Departamento Técnico  
FIA Sport / Technical Department

11/10

CMDA / WMSC 07.12.2011  
Publicado el / Published on 07.12.2011

### 8.3.2.4 Tirantes desmontables:

Si se usan tirantes desmontables en la construcción de una estructura de seguridad, las conexiones desmontables utilizadas deben estar conformes con un tipo aprobado por la FIA (ver dibujos 253-37 a 253-47).

No podrán soldarse después de ensamblarse.

Los tornillos y las tuercas deben ser de una calidad ISO 8.8 o superior (norma ISO).

Las conexiones desmontables que cumplan con los dibujos 253-37, 253-40, 253-43, 253-46 y 253-47 están reservadas solamente para fijar los tirantes y los refuerzos opcionales descritos en el artículo 253-8.3.2.2 y están prohibidas para unir las partes superiores del arco principal, del arco delantero, de los semiarcos laterales y de los arcos laterales.

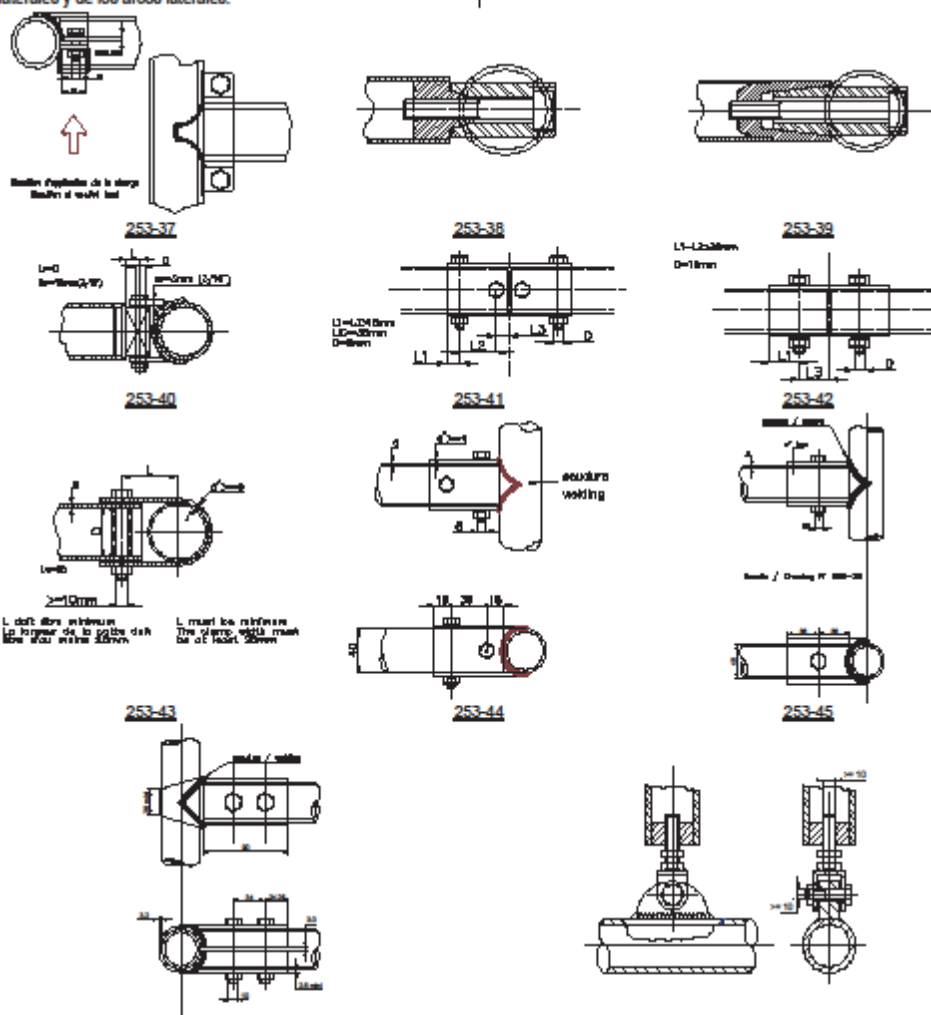
### 8.3.2.4 Removable members:

Should removable members be used in the construction of a safety cage, the dismantable joints used must comply with a type approved by the FIA (Drawings 253-37 to 253-47).

They must not be welded once assembled.

The screws and bolts must have a minimum quality of 8.8 (ISO standard).

Dismountable joints complying with Drawings 253-37, 253-40, 253-43, 253-46 and 253-47 are solely for attaching optional members and reinforcements described by article 253-8.3.2.2, and are forbidden for joining the upper parts of the main rollbar, of the front rollbar, of the lateral half-rollbars and of the lateral rollbars.



### 8.3.2.5 Especificaciones complementarias:

Longitudinalmente, la estructura de seguridad debe estar completamente contenida entre los anclajes de los elementos de las suspensiones delanteras y traseras que soportan las cargas verticales (muelles y amortiguadores).

Los refuerzos suplementarios que excedan estos límites se autorizan entre la estructura de seguridad y los puntos de anclaje de las barras antibalaneo traseras en la carrocería/chasis.

Cada uno de esos puntos de anclaje puede ser conectado a la

### 8.3.2.5 Additional constraints:

Longitudinally, the safety cage must be entirely contained between the mounting points of the front and rear suspension elements carrying the vertical loads (springs and shock absorbers).

Supplementary reinforcements exceeding these limits are authorised between the safety cage and the anchorage points of the rear anti-roll bars on the bodyshell/chassis.

Each of these anchorage points may be connected to the safety



estructura de seguridad mediante un solo tubo de dimensiones de 30 x 1,5 mm.

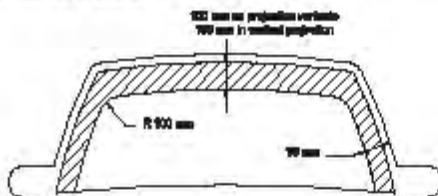
Para los vehículos homologados desde el 01/01/2002:

En protección frontal, los refuerzos de los ángulos y de las uniones de los ángulos superiores del arco delantero deben ser visibles únicamente a través de la superficie del parabrisas descrita en el dibujo 253-48.

Para todas las estructuras de seguridad de los vehículos de "Super Production" y "Super 2000", homologadas a partir del 01/01/2000, y para todas las estructuras de seguridad para vehículos de rallyes homologadas a partir de 01/01/2001:

La apariencia de la estructura de seguridad en la abertura de la puerta debe cumplir con los criterios siguientes (ver dibujo 253-49):

Dimensión A debe tener un mínimo de 300 mm.  
Dimensión B debe tener un máximo de 250 mm.  
Dimensión C debe tener un máximo de 300 mm.  
Dimensión E no debe ser superior a la mitad de la altura de la apertura de la puerta (H).



#### 8.3.2.6 Puntos de anclaje de la estructura a la carrocería o chasis:

El mínimo de puntos de anclaje es:

- 1 para cada montante del arco delantero;
- 1 para cada montante de los arcos laterales o semiarcos laterales;
- 1 para cada montante del arco principal;
- 1 para cada tirante longitudinal trasero.

Para conseguir un montaje óptimo sobre la carrocería, el guarnecido original puede ser modificado junto a la estructura de seguridad o sus puntos de anclaje, recortándolo o modificándolo localmente.

Sin embargo, esta modificación no permite la eliminación completa de partes de la tapicería o guarnecido.

Donde sea necesario, la caja de fusibles puede ser trasladada para fijar la estructura.

Puntos de anclaje del arco delantero, arco principal, arcos laterales o semiarcos laterales:

Cada punto de anclaje debe incluir una placa de refuerzo, de un espesor de, al menos, 3 mm.

Cada pie de anclaje debe estar fijado por, al menos, 3 tornillos en una placa de refuerzo de, al menos, 3 mm de espesor y de, al menos, 120 cm<sup>2</sup> que estará soldada a la carrocería.

Para los vehículos homologados a partir del 01/01/2007, el área de 120 cm<sup>2</sup> debe ser la de contacto entre la placa de refuerzo y la carrocería.

Se muestran ejemplos en los dibujos 253-50 a 253-56.

Para el dibujo 253-52 la placa de refuerzo no necesita estar soldada necesariamente a la carrocería.

En el caso del dibujo 253-54, los laterales de los puntos de anclaje pueden estar cerrados con una placa soldada.

Los tornillos deben ser de, al menos, M8 de una calidad ISO 8.8 o mejor (norma ISO).

Las tuercas serán autoblocantes o dotadas de arandelas de bloqueo.

El ángulo entre 2 tornillos (medido con respecto al eje central del tubo al nivel del pie de anclaje, véase el dibujo 253-50) no debe ser inferior a 60 grados.

Puntos de anclaje de los tirantes traseros:

Cada tirante longitudinal trasero deberá fijarse con un mínimo de 2 tornillos M8 con las placas de refuerzo de un área de, al menos, 60 cm<sup>2</sup> (dibujo 253-57), o fijadas por un solo tornillo a doble cruzadura, (dibujo 253-58), bajo reserva de que sea de la sección y resistencia adecuadas y a condición de que se suelde un manguito al tirante.

Estas exigencias son las mínimas.

Como complemento podrán utilizarse fijaciones suplementarias, los pies de los arcos podrán soldarse a las placas de refuerzo, las

cage by a single tube with dimensions of 30 x 1.5 mm.

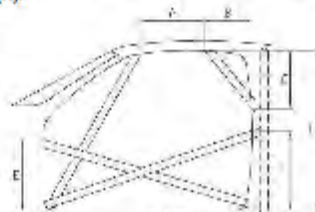
For cars homologated as from 01/01/2002:

In frontal projection, reinforcements of bends and junctions of the upper corners of the front roll-cage must be only visible through the area of the windscreen described by Drawing 253-48.

For all the safety cages for "Super Production" and "Super 2000" cars homologated as from 01/01/2000 and for all the safety cages for rally cars homologated as from 01/01/2001:

The presence of the cage reinforcements in the door aperture must comply with the following criteria (Drawing 253-49):

- Dimension A must be a minimum of 300 mm
- Dimension B must be a maximum of 250 mm
- Dimension C must be a maximum of 300 mm
- Dimension E must not be more than half the height of the door aperture (H).



#### 8.3.2.6 Mounting of rollcages to the bodyshell/chassis:

Minimum mounting points are:

- 1 for each pillar of the front rollbar;
- 1 for each pillar of the lateral rollbars or lateral half-rollbars;
- 1 for each pillar of the main rollbar;
- 1 for each backstay.

To achieve an efficient mounting to the bodyshell, the original interior trim may be modified around the safety cages and their mountings by cutting it away or by distorting it.

However, this modification does not permit the removal of complete parts of upholstery or trim.

Where necessary, the fuse box may be moved to enable a rollcage to be fitted.

Mounting points of the front, main, lateral rollbars or lateral half-rollbars:

Each mounting point must include a reinforcement plate at least 3 mm thick.

Each mounting foot must be attached by at least three bolts on a steel reinforcement plate at least 3 mm thick and of at least 120 cm<sup>2</sup> area which is welded to the bodyshell.

For cars homologated as from 01/01/2007, the area of 120 cm<sup>2</sup> must be the contact surface between the reinforcement plate and the bodyshell.

Examples according to Drawings 253-50 to 253-56.

For Drawing 253-52, the reinforcement plate need not necessarily be welded to the bodyshell.

In the case of Drawing 253-54, the sides of the mounting point may be closed with a welded plate.

Fixing bolts must have a minimum diameter of M8 and a minimum quality of 8.8 (ISO standard).

Fasteners must be self-locking or fitted with lock washers.

The angle between 2 bolts (measured from the tube axis at the level of the mounting foot cf. drawing 253-50) must not be less than 60 degrees.

Mounting points of the backstays:

Each backstay must be secured by a minimum of 2 M8 bolts with mounting feet of at least 60 cm<sup>2</sup> area (Drawing 253-57), or secured by a single bolt in double shear (Drawing 253-58), provided it is of adequate section and strength and provided that a bush is welded into the backstay.

These are minimum requirements.

In addition, more fasteners may be used, the support plates of the mounting feet may be welded to reinforcement plates, the safety

estructuras (definidas por el art. 253-8.3.1) podrán soldarse a la carrocería/chasis.

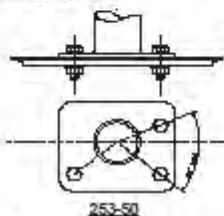
**Caso especial:**

Para carrocerías/chasis que no sean de acero, cualquier soldadura entre la estructura de seguridad y la carrocería/chasis está prohibida, solo se permite el pegado de la placa de refuerzo a la carrocería/chasis.

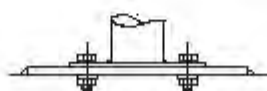
cage (as defined by article 253-8.3.1) may be welded to the bodyshell/chassis.

**Special case:**

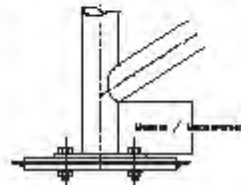
For non steel bodyshells/chassis, any welding between the cage and the bodyshell/chassis is prohibited, only the bonding of the reinforcement plate on the bodyshell/chassis is permitted.



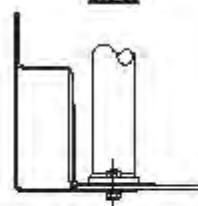
253-50



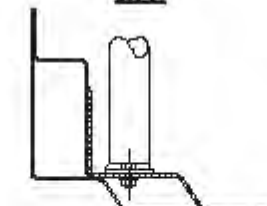
253-51



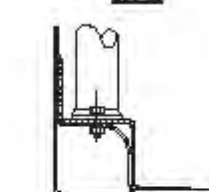
253-52



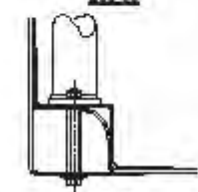
253-53



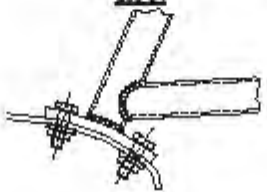
253-54



253-55



253-56



253-57



253-58

**8.3.3 Especificaciones del material**

Sólo se autorizan tubos de sección circular.  
Especificaciones de los tubos utilizados:

Material	Resistencia mínima a la tracción	Dimensiones mínimas (mm)	Utilización
Acero al carbono no aleado (ver a continuación) conformado en frío sin soldadura conteniendo un máximo del 0,3% de carbono.	350 N/mm <sup>2</sup>	45 x 2,5 (1,75"x0,095") o 50 x 2,0 (2,0"x0,083")	Arco principal (Dibujos 253-1 y 253-3) o arcos laterales, y miembros transversales traseros (Dibujo 253-2) según la construcción
		38 x 2,5 (1,5"x0,095") o 40 x 2,0 (1,6"x0,083")	Semiarcos laterales y otras partes de la estructura de seguridad (a menos que se especifique otra cosa en los artículos anteriores)

Nota: Para un acero no aleado, el contenido máximo de aditivos es de 1,7% para manganeso y de 0,6% para otros elementos. Al seleccionar el acero, debe prestarse atención a la obtención de buenas propiedades de elongación y adecuadas características de soldabilidad.

**8.3.3 Material specifications**

Only tubes with a circular section are authorised.  
Specifications of the tubes used:

Material	Minimum tensile strength	Minimum dimensions (mm)	Use
Cold drawn seamless unalloyed carbon steel (see below) containing a maximum of 0.3 % of carbon	350 N/mm <sup>2</sup>	45 x 2,5 (1,75"x0,095") or 50 x 2,0 (2,0"x0,083")	Main rollbar (Drawings 253-1 y 253-3) or Lateral rollbars and rear transversal member (Drawing 253-2) according to construction
		38 x 2,5 (1,5"x0,095") or 40 x 2,0 (1,6"x0,083")	Lateral half-rollbars and other parts of the safety cage (unless otherwise indicated in the articles above)

Nota: For an unalloyed steel, the maximum content of additives is 1.7 % for manganese and 0.6 % for other elements. In selecting the steel, attention must be paid to obtaining good elongation properties and adequate weldability.



## **ANEXO B: TIPOS DE ENSAYOS, referencia bibliográfica [14]**



Departamento Técnico RFEA

bisagra en la estructura permitiendo su deformación. Su uso está reservado a los tirantes de los arcos y a los elementos de refuerzo opcionales.

### **Indicaciones para la soldadura.**

Todas las soldaduras deben ser de la mejor calidad posible y de una penetración total (preferentemente soldadura al arco en atmósfera de gas inerte TIG MIG). **¡Deberán cubrir todo el perímetro del tubo!**

Una estructura de seguridad que se ajusta escrupulosamente a las normas y sin embargo, tiene cordones de soldadura no completados en toda la periferia del tubo, se puede considerar **no conforme**.

Aunque una buena apariencia exterior no garantiza necesariamente la calidad de la soldadura, una soldadura de mala apariencia no será nunca señal de un buen trabajo.

En el caso de utilizar acero tratado térmicamente deben seguirse las instrucciones del fabricante (electrodos especiales, soldadura en atmósfera inerte).

Debe señalarse que la utilización de aceros tratados térmicamente o con alto contenido en carbono puede ocasionar problemas y que una mala fabricación puede resultar en una disminución de la resistencia (causada por las zonas afectadas por el calor), una tenacidad inadecuada y contracciones internas.

### **- Cómo debe ser el cálculo de la estructura:**

Este informe se realiza para demostrar que el arco resiste unas determinadas cargas estáticas, que la deformación bajo carga se encuentra dentro de unos límites y que no hay rotura. Dado que una estructura solamente debe considerarse en su conjunto, el cálculo debe llevarse a cabo sobre ella completa.

Este cálculo, que podrá realizarse en CATIA, CAD CAM u otros similares, consta de dos partes o ensayos teóricos:

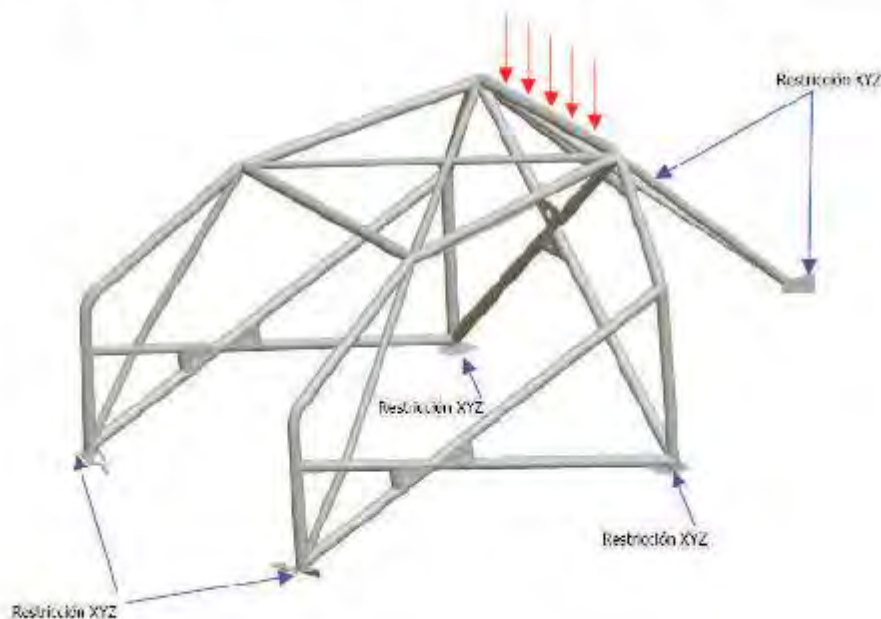
#### **- 1.- Estudio sobre el arco principal:**

En general, existiendo otras especialidades con otros requerimientos, en la mayoría de las especialidades, el arco completo debería resistir una carga estática vertical de 7.5p daN (p es el peso del coche + 150 kilogramos) aplicado en la parte superior del arco principal (véase figura siguiente).

Sobre la estructura de seguridad completa, no debería producirse ni rotura, ni deformación superior a 50 mm, medidos bajo carga según el eje de aplicación de la dicha carga.



## Carga vertical sobre arco principal:

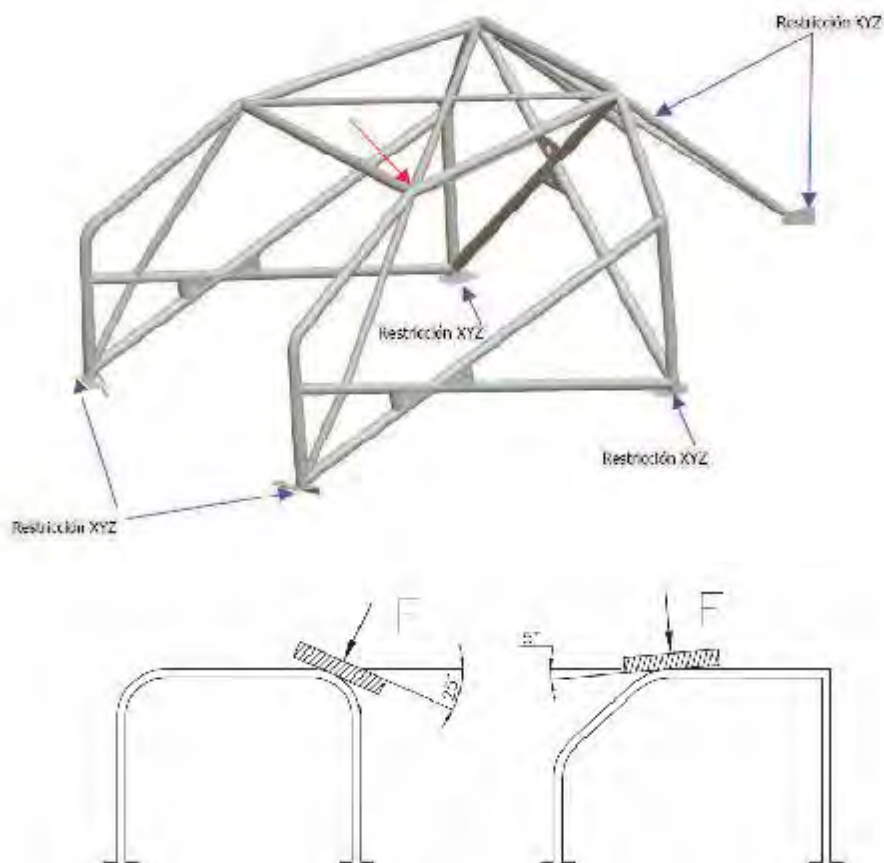


### - 2.- Estudio sobre el arco delantero:

El arco completo debería resistir una carga de  $3.5 \cdot p$  daN ( $p$  es el peso del coche + 150 kilogramos) aplicado en la parte superior del arco delantero, en el lado del piloto y en la intersección con el miembro transversal delantero.

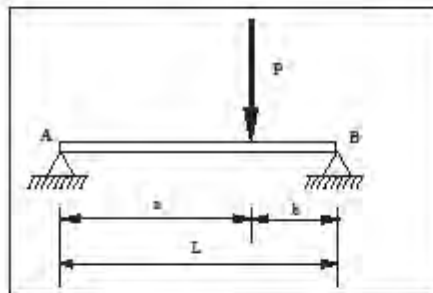
Sobre la estructura de seguridad completa, no debería producirse ni rotura, ni deformación superior a 100 mm, medidos bajo carga según el eje de aplicación de la carga.

## Carga sobre arco frontal-lateral:



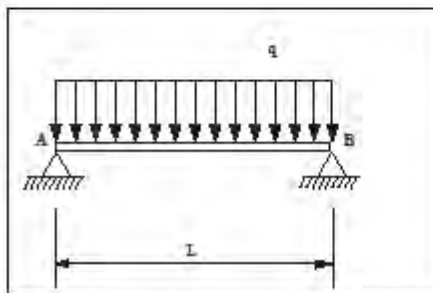
**ANEXO C: GIROS Y DESPLAZAMIENTOS DE VIGAS DE UN SOLO TRAMO, referencia bibliográfica [2]**

**GIROS Y DESPLAZAMIENTOS DE VIGAS  
DE UN SOLO TRAMO**

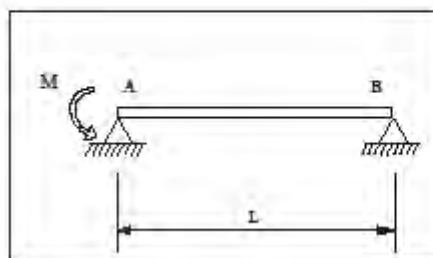


$$\theta_A = \frac{P \cdot a \cdot b}{6 \cdot E \cdot I \cdot L} \cdot (L + b)$$

$$\theta_B = \frac{P \cdot a \cdot b}{6 \cdot E \cdot I \cdot L} \cdot (L + a)$$

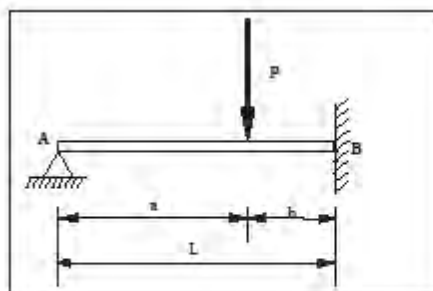


$$\theta_A = \theta_B = \frac{q \cdot L^3}{24 \cdot E \cdot I}$$

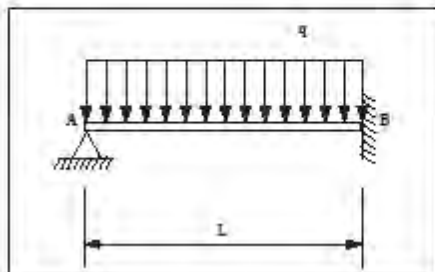


$$\theta_A = \frac{M \cdot L}{3 \cdot E \cdot I}$$

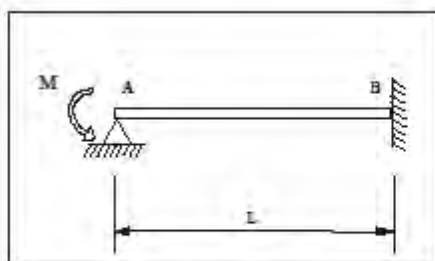
$$\theta_B = \frac{M \cdot L}{6 \cdot E \cdot I}$$



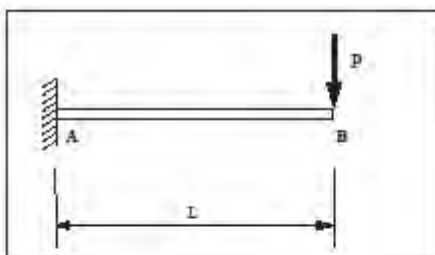
$$\theta_A = \frac{P \cdot a \cdot (L - a)^2}{4 \cdot E \cdot I \cdot L}$$



$$\theta_A = \frac{q \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

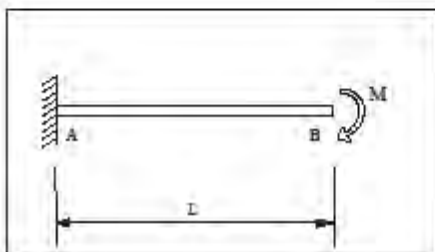


$$\theta_A = \frac{M \cdot L}{4 \cdot E \cdot I}$$



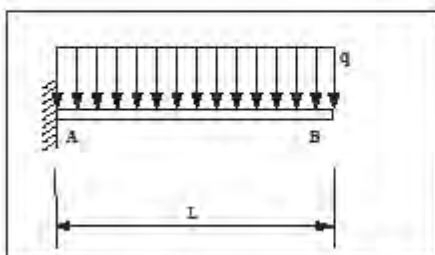
$$f_B = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

$$\theta_B = \frac{P \cdot L^2}{2 \cdot E \cdot I}$$



$$f_B = \frac{M \cdot L^2}{2 \cdot E \cdot I}$$

$$\theta_B = \frac{M \cdot L}{E \cdot I}$$



$$f_B = \frac{q \cdot L^4}{8 \cdot E \cdot I}$$

$$\theta_B = \frac{q \cdot L^3}{6 \cdot E \cdot I}$$

2



